

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

جامعة البشير الابراهيمى - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Electromécanique

# Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du **diplôme de**

**MASTER**

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Présenté :

➤ *BENCHABANE Smail*

➤ *BELHADJ Said*

Intitulé :

*Étude et simulation d'un système photovoltaïque alimentant une  
machine à courant continu*

Soutenu le : 02/07/2023

Devant le jury composé de :

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Elkheir MERABET</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Abderrahim REFFAS</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadrant</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ELyazid ZAIDI</i>	<i>MCB</i>	<i>Co- encadrant</i>	<i>ENSH-BLIDA</i>
<i>M. Hichem TALHAOUI</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2022/2023

---

---

## Remerciements

*Tout d'abord, on tient à remercier Dieu le tout puissant pour ses bienfaits inestimables, de nous avoir permis de terminer nos études ainsi que ce modeste travail dans de bonnes conditions.*

*Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de [Master en électromécanique dans le Département d'Electromécanique de la Faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj](#). Nous tenons à remercier :*

*Monsieur [Abderrahim REFFAS](#), Maitre de conférence [MCA](#) à l'Université de [Bordj Bou Arreridj](#), de nous avoir proposé le sujet de ce mémoire et en nous faisant profiter de ses conseils judicieux. Nous tenons à le féliciter de sa patience dont il a su faire preuve à notre égard.*

*Monsieur [Elyazid ZAIDI](#), Maitre de conférence [MCB](#) à l'école nationale supérieure d'hydraulique de [Blida](#), de nous avoir proposé le sujet de ce mémoire et en nous faisant profiter de ses conseils judicieux et de nous avoir aidé et guidé avec une grande efficacité. Nous tenons à le remercier pour sa patience dont il a su faire preuve à notre égard.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements à Monsieur [Elkheir MERABET](#), Professeur à l'université de [Bordj Bou Arreridj](#), pour avoir fait l'honneur de présider le jury de notre mémoire. Nos remerciements vont de même au membre de jury examinateur qui nous a fait l'honneur de participer au jury de notre mémoire. Il s'agit, en l'occurrence de : Dr. [Hichem TALHAOUI](#) Maitre de conférence [MCA](#), à l'Université de [Bordj Bou Arreridj](#).*

---

# *Dédicace*

*Enfin, nous avons obtenu notre diplôme et nous avons enfin tiré notre chapeau en signe de respect pour des années d'études. Les adieux ont commencé avec chaque sourire, avec chaque coup qui a pris le début des adieux, et les premiers remerciements vont à Allah le Tout-Puissant. Pour ceux qui nous inspirent et nous donnent du courage, pour ceux à qui nous devons amour et gratitude. Nos chers parents. Nos frères. Nos sœurs. Nos familles et nos proches. Toutes les personnes qui nous connaissent et qui dépendent de nous. Et tous nos amis (es).*

**BENCHABANE SMAIL**

**&**

**BELHADJ SAID**

---

## Le tableau des matières

Remerciements.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Dédicace.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures .....	viii
Liste des Abréviations & Symboles.....	xi
Introduction Générale .....	1

### Chapitre 1 Etat de l'art sur les systèmes des énergies renouvelables

1.1 Introduction.....	3
1.2 Différentes sources d'énergies renouvelables .....	4
1.2.1 Solaire photovoltaïque .....	4
1.2.2 Solaire thermique .....	5
1.2.3 L'éolien .....	6
1.2.4 Petite hydroélectricité .....	7
1.2.5 Biomasse .....	9
1.2.6 Géothermie .....	10
1.3 Batterie .....	11
1.3.1 Introduction.....	11
1.3.2 Description d'une Batterie .....	11
1.3.3 Différents types de Batteries.....	11
1.3.3.1 Batterie au Plomb-Acide.....	11
1.3.3.2 Batterie Nickel-Cadmium .....	13
1.3.3.3 Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH).....	13
1.3.3.4 Batterie Lithium-Ion (Li-Ion).....	14

1.4 Conclusion.....	15
Références.....	16

## Chapitre 2 : Généralité sur les systèmes photovoltaïque

2.1 Introduction.....	18
2.2 Généralités sur les systèmes solaires.....	18
2.2.1 Spectre solaire .....	26
2.2.2 Rayonnement solaire .....	26
2.2.3 L'énergie solaire .....	21
2.3 Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque .....	21
2.3.1 Modèle électriques d'une cellule photovoltaïque .....	21
2.3.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....	23
2.3.2.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) .....	23
2.3.2.2 Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ) .....	23
2.3.2.3 Puissance de la cellule PV .....	24
2.3.2.4 Puissance maximale d'une cellule PV .....	24
2.3.2.5 Rendement énergétique .....	25
2.3.2.6 Facteur de forme .....	25
2.4 Comportement d'un générateur photovoltaïque .....	26
2.4.1 Influence l'ensoleillement.....	26
2.4.2 Influence de la température .....	27
2.5 Charge.....	29
2.6 Commande MPPT.....	29
2.6.1 Introduction .....	29
2.6.2 Commande MPPT .....	30
2.7 Algorithme Perturbation et Observation .....	30
2.7.1 Organigramme Perturber et Observer .....	32
2.8 Convertisseur DC-DC (hacheurs) .....	33

2.8.1 Hacheur dévolteur (buck).....	33
2.8.2 Hacheur survolteur (boost).....	35
2.8.3 Hacheur dévolteur-survolteur.....	37
2.9 Conclusion.....	38
Références.....	39

### Chapitre 3 :Modélisation et commande du système GPV-Batterie-MCC

3.1 Introduction.....	41
3.2 Modélisation de la machine a courant contenu (MCC).....	41
3.3 Principe de fonctionnement de moteur à courant continu.....	42
3.3.1 L'inducteur .....	42
3.3.2 L'induit .....	43
3.3.3 Balais .....	44
3.4 Types des MCC.....	45
3.4.1 MCC à Excitation série.....	45
3.4.2 MCC a Excitation parallèle .....	45
3.4.3 MCC à excitation indépendant .....	46
3.5 Modélisation mathématique d'une MCC.....	46
3.5.1 Equation de l'inducteur (excitation) .....	47
3.5.2 Equation de l'induit .....	47
3.5.3 Equation de couple .....	47
3.5.4 Equation mécanique .....	47
3.5.5 Position du rotor .....	48
3.6 Schéma bloc de la MCC au niveau de <i>Matlab/Simulink</i> .....	48
3.7 Résultats de simulation .....	49
3.7.1 Simulation de la MCC sans commande .....	49
3.7.2 Simulation de la MCC avec commande PI .....	50
3.8 Schéma bloc de la commande du système GPV-Batterie-MCC sous Matlab/Simulin.....	52
3.9 Conclusion.....	59

---

Références.....	60
Conclusion générale.....	60
Annexe A : Cellule photovoltaïque .....	61
Annexe B: Association de cellule photovoltaïque .....	63
Annexe C: PPM .....	65
Annexe D: Paramètres du système .....	68

---

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 Différentes sources renouvelables employées à des fins énergétiques .....	3
---	---

---

---

## Liste des figures

Figure 1.1 Solaire photovoltaïque.....	5
Figure 1.2 Solaire thermique.....	6
Figure 1.3 L'éolien .....	7
Figure 1.4 Petite hydroélectricité .....	8
Figure 1.5 Biomasse .....	9
Figure 1.6 L'énergie géothermique.....	10
Figure 1.7 Description de l'intérieur d'une batterie.....	11
Figure 1.8 Batteries acide/plomb .....	12
Figure 1.9 Batterie nickel-cadmium (NiCd) .....	13
Figure 1.10 Batterie Ni-MH .....	13
Figure 1.11 Batteries lithium-ion (Li-Ion) .....	14
Figure 2.1 Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	19
Figure 2.2 Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque.....	20
Figure 2.3 Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode. ....	22
Figure 2.4 Puissance maximale idéale et pratique .....	25
Figure 2.5 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	26
Figure 2.6 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	27
Figure 2.7 L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ .....	28
Figure 2.8 L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ .....	28
Figure 2.9 Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	30
Figure 2.10 Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.....	31
Figure 2.11 Algorithme de la méthode P&O (CP est la largeur du pas de perturbation).....	32
Figure 2.12 Convertisseur DC/DC.....	33
Figure 2.13 Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (Buck).....	34

---

Figure 2.14 Schémas équivalents du hacheur dévolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert.....	34
Figure 2.15 Schéma de principe d'un convertisseur (Boost) .....	36
Figure 2.16 Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert.....	36
Figure 2.17 Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur.....	37
Figure 2.18 Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert .....	38
Figure 3.1 Convertisseur énergies réversible.....	42
Figure 3.2 Schéma des principes éléments d'une machine à courant continu.....	43
Figure 3.3 L'inducteur de la MCC.....	44
Figure 3.4 L'induit de la MCC .....	44
Figure 3.5 Composition de l'induit de la MCC .....	45
Figure 3.6 L'ensemble des porte-balais et collecteur de la MCC.....	45
Figure 3.7 Modèle électrique équivalent de la MCC à excitation série.....	46
Figure 3.8 Schéma électrique équivalent de la MCC à excitation parallèle .....	47
Figure 3.9 Schéma électrique d'une MCC à excitation séparée.....	47
Figure 3.10 Schéma électrique d'une machine à excitation séparée .....	48
Figure 3.11 Schéma de la MCC au niveau de MATLAB.....	49
Figure 3.12 Allures des grandeurs électromécaniques de la vitesse et le couple de la machine MCC sans commande.....	50
Figure 3.13 Allure de grandeur électrique des courants de la machine MCC sans commande.....	50
Figure 3.14 Allures des grandeurs électromécaniques de la vitesse et le couple de la machine MCC avec régulateur PI.....	51
Figure 3.15 Allure de grandeur électrique des courants de la machine MCC avec régulateur PI.....	51
Figure 3.16 Schéma de la commande du système GPV-Batterie-MCC sous Matlab/Simulink.....	52
Figure 3.17 Allures du courant de GPV ( $G = 1000$ ; $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).....	53
Figure 3.18 Allure de la tension de GPV ( $G = 1000$ ; $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).....	53
Figure 3.19 Allure de la puissance de GPV ( $G = 1000$ ; $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).....	53

---

Figure 3.20	Allure des tensions, de batterie et du Bus contenu (G =1000 ; T=25 <sup>0</sup> C).....	54
Figure 3.21	Allure du courant de batterie (G =1000 ; T=25 <sup>0</sup> C).....	54
Figure 3.22	Allure de la puissance de batterie (G =1000 ; T=25 <sup>0</sup> C).....	54
Figure 3.23	Allure de la tension de source (G =1000 ; T=25 <sup>0</sup> C).....	55
Figure 3.24	Allure du courant de source (G =1000 ; T=25 <sup>0</sup> C).....	55
Figure 3.25	Allure du courant de GPV (G1=800 ; G2 =1000 ; G3=700 et T=25 <sup>0</sup> C).....	56
Figure 3.26	Allure de la tension de GPV (G1=800 ; G2 =1000 ; G3=700 et T=25 <sup>0</sup> C).....	56
Figure 3.27	Allure de la puissance de GPV (G1=800 ; G2 =1000 ; G3=700 et T=25 <sup>0</sup> C).....	57
Figure 3.28	Allure des tensions, de batterie et du Bus contenu (G1=800 ; G2 =1000 ; G3=700 et T=25 <sup>0</sup> C).....	57
Figure 3.29	Allure du courant de batterie (G1=800 ; G2 =1000 ; G3=700 et T=25 <sup>0</sup> C).....	57
Figure 3.30	Allure de la puissance de batterie G1=800 ; G2 =1000 ; G3=700 ; T=25 <sup>0</sup> C)....	58
Figure 3.31	Allure de la tension de source G1=800 ; G2 =1000 ; G3=700 ; T=25 <sup>0</sup> C).....	58

---

## *Liste des Abréviations & Symboles*

<b>NiCd :</b>	Nickel-cadmium.
<b>Ni-MH :</b>	Nickel-Métal Hydrure.
<b>Li-Ion :</b>	Lithium-Ion.
<b>PV :</b>	Photovoltaïque.
<b>GPV :</b>	Générateur photovoltaïque.
<b>IEC :</b>	International Electrotechnical commission.
<b>E :</b>	Energie d'un photon.
<b>h :</b>	Constante de Planck [j. s <sup>-1</sup> ].
<b>C :</b>	Vitesse de la lumière [m. s <sup>-1</sup> ].
<b>λ :</b>	Longueur d'onde [m].
<b>R<sub>s</sub> :</b>	Résistance montée en série.
<b>R<sub>sh</sub> :</b>	Résistance shunt
<b>I<sub>ph</sub> :</b>	Photo courant produit.
<b>I<sub>sat</sub> :</b>	Courant de saturation de la diode.
<b>R<sub>s</sub>, R<sub>sh</sub> :</b>	Résistance série et la résistance parallèle, respectivement.
<b>V<sub>t</sub> :</b>	Tension thermique a la température T
<b>q :</b>	Charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19} C$ ).
<b>K :</b>	Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J / K$ ).
<b>K<sub>i</sub> :</b>	Constante ( $1.2A/cm^2K^3$ ).
<b>n :</b>	Facteur de non idéalité de la jonction.
<b>T :</b>	Température effective de la cellule en degré Kelvin.
<b>E<sub>g</sub> :</b>	Energie de gap (pour le silicium cristallin est égale a 1.12 eV).
<b>G :</b>	L'ensoleillement en $W / m^2$ .
<b>P(w) :</b>	Puissance fournie par la cellule PV.
<b>V(V) :</b>	Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
<b>I(A) :</b>	Intensité débitée par la cellule PV.
<b>P<sub>max</sub> (W) :</b>	Puissance fournie par la cellule PV.

---

<b><math>V_{CO}(V)</math>:</b>	Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.
<b><math>I_{CC}(A)</math>:</b>	L'intensité de court – circuit débitée par la cellule PV.
<b><math>n_p</math>:</b>	Nombre de cellule en parallèle.
<b><math>n_s</math> :</b>	Nombre de cellule en série.
<b>MPPT:</b>	Maximum Power Point Tracking.
<b>PPM :</b>	Point de puissance maximale.
<b>P&amp;O :</b>	Algorithme Perturbation et Observation.
<b>L:</b>	Excitation composée long.
<b>S:</b>	Excitation composée courte (short).
<b><math>\omega</math> :</b>	Vitesse de rotation en radians/seconde.
<b><math>C_r</math> :</b>	Couple résistant imposé par la charge.

---

# *Introduction Générale*

---

# Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles.

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Les sources d'énergies renouvelables, telles que : l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie Biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire. On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la Terre, de l'eau ou encore de la biomasse. De plus, les différents types des énergies tel que : les énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Notre travail est divisé en trois parties :

**Dans le premier chapitre**, nous proposons un état d'art sur les systèmes d'énergies renouvelables et les batteries, l'objectif étant de créer une base de connaissances sur les différents types des systèmes d'énergies renouvelables et les accumulateurs qui permette une critique pertinente de ses performances pour notre choix d'architecteur étudié.

**Dans le deuxième chapitre**, nous essayons de faire un rappel sur les notions de base de l'effet photovoltaïque, nous présentons les caractéristiques et la modélisation de la cellule photovoltaïque et leurs différents modèles, ainsi que la Commande **MPPT** et les convertisseurs **DC/DC**.

**Dans le dernier chapitre**, nous présentons la modélisation et la commande d'une machine à courant continu alimentée par générateur photovoltaïque. Notre objectif est de sélectionner une méthode de commande qui répond aux contraintes et aux normes nécessaires pour une application hydraulique en agriculture, où la majorité des champs sont situés dans des zones isolées et décentralisée.

***Chapitre 1 :***  
***Etat de l'art sur les systèmes des énergies***  
***renouvelables***

## Chapitre 1 : Etat de l'art sur les systèmes des énergies renouvelables

### 1.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie inépuisables fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau et les marées, ou la croissance des plantes. Leur exploitation ne génère que peu ou pas de déchets ou d'émissions polluantes [1]. Actuellement, sous-exploitées par rapport à leur potentiel, seuls 15% de la consommation mondiale d'électricité est couverte par les énergies renouvelables. Pourtant, l'emploi de ces énergies présente des intérêts non négligeables, liés en particulier à la diminution de la dépendance aux énergies fossiles et particulièrement au pétrole et également à la réduction de l'impact environnemental lié aux émissions de gaz à effet de serre.

Un emploi plus répandu des énergies renouvelables afin de réduire les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère permettrait de respecter les accords du Protocole de Kyoto [1].

Dans ce chapitre, nous proposons un état de l'art sur les systèmes d'énergie renouvelable et les batteries, l'objectif étant de créer une base de connaissances sur les différents types de système d'énergie renouvelable et de batterie qui permettra de faire une critique pertinente de leurs performances vis-à-vis du choix de la structure étudiée dans le cadre de ce travail.

**Tableau 1.1** : Différentes sources renouvelables employées à des fins énergétiques [1].

<i>Quelle source</i>	<i>Comment la capter et la transformer</i>	<i>Sous quelle forme utiliser</i>
<i>Photovoltaïque</i>	-Cellules Photovoltaïques	-Électricité directe ou stockée en batteries -Électricité injectée dans le réseau
<i>Thermique</i>	-Serres, murs capteurs	-Chauffage
	-Capteurs solaires basse température -Capteurs solaires haute température	-Eau chaude sanitaire -Chauffage par le plancher -Électricité injectée dans le réseau -Chaleur a très haute température dans un four
	-Moulin a vent	-Force mécanique (mouture de céréales)
	-Eolienne mécanique	-Force mécanique (pompage de

<b>Eolien</b>		l'eau)
	-Aérogénérateur	-Électricité directe ou stockée en batteries -Électricité injectée dans le réseau
<b>Hydraulique</b>	-Moulin a eau	-Force mécanique (mouture de céréales)
	-Petite centrale hydroélectrique -Grande centrale hydroélectrique	-Électricité directe ou stockée en batteries -Électricité injectée dans le réseau
	-Marémotrice (courants marins et vagues)	-Électricité injectée dans le réseau
<b>Biomasse</b>	-Distillerie, unité d'estérification (blé, betterave, colza, tournesol)	-Biocarburants pour les transports
	-Chaudière biocombustibles (bois, sciure, paille, rafles de maïs)	-Chauffage -Électricité (cogénération) injectée dans le réseau
	-Bio digesteur, méthaniser (déchets, organiques, poubelles)	-Biogaz pour les transports, pour le chauffage ou l'électricité
<b>Géothermie</b>	-Pompes à chaleur (source a moins de 30°C)	-Chauffage -climatisation
	-Centrales basse et moyenne énergie (130°C a 150°C)	-Chauffage
	-Centrales haute énergie (plus de 150°C)	-Chauffage -Électricité injectée dans le réseau

## 1.2 Différentes sources d'énergies renouvelables

### 1.2.1 Solaire photovoltaïque

Le fonctionnement des dispositifs photovoltaïques se base sur la capacité de certains matériaux semi-conducteurs, traités spécialement, de convertir l'énergie de la radiation solaire en énergie électrique (courant continu et tension contenu) sans avoir recours à des organes mécaniques en mouvement (Figure 1.1) [1]. En effet, le matériel semi-conducteur le plus couramment employé dans ce but est la silice. De plus, le composant de base d'une installation PV est la cellule photovoltaïque, capable de produire environ 1,5W de puissance en conditions standards, c'est à dire à une température de 25°C et soumise à une puissance de

la radiation égale à  $1000 \text{ W/m}^2$  [1]. Par conséquent, le gain électrique réel en fonctionnement est en réalité inférieur à la valeur de pic à cause des températures plus élevées et des valeurs plus basses de la radiation. De plus, plusieurs cellules assemblées et reliées entre elles en une seule structure unique forment le module photovoltaïque, selon la tension nécessaire à l'alimentation des installations électriques, anise, plusieurs modules peuvent être reliés en série en une chaîne [2].

La puissance électrique réclamée détermine ensuite le nombre de chaînes à relier en parallèle pour réaliser un générateur PV. Finalement, la technologie photovoltaïque (PV) est à présent utilisée pour des applications terrestres, comme l'alimentation d'habitations isolées ou dans le cadre de panneaux installés sur des bâtiments et reliés au réseau électrique déjà existant.



Figure 1.1 : Solaire photovoltaïque

**a. Avantage :**

- ✚ L'énergie photovoltaïque est modulable et permet de répondre à tous les besoins ;
- ✚ Panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés aussi bien en ville qu'à la campagne [3].

**b. Inconvénients :**

- ✚ Investissement important lors de leur installation ;
- ✚ Depuis la suppression du crédit d'impôt, le retour sur investissement est rallongé de 9 à 18 mois en Europe [3].

### 1.2.2. Solaire thermique

La radiation solaire, malgré sa faible densité (qui atteint  $1\text{kW/m}^2$  seulement dans le cas de journées ensoleillées) reste la source énergétique la plus abondante et propre sur la surface terrestre (Figure 1.2) [1]. En effet, la technologie pour l'utilisation thermique de l'énergie solaire a atteint une maturité et une fiabilité telle qu'elle peut rentrer à présent parmi les moyens les plus rationnels et propres pour chauffer l'eau ou l'air à usage domestique et productif [2].

Le rendement des panneaux solaires a augmenté de 30% au cours de la dernière décennie, rendant ainsi compétitives les applications dans le bâtiment, la construction d'habitations et de résidences, et l'agriculture [2]. De plus, un mètre carré de panneau solaire peut réchauffer à  $45\text{-}60^\circ\text{C}$  entre 40 litre et 300 litre d'eau en une journée selon le rendement. Par conséquent, l'application la plus commune est celle du capteur solaire thermique utilisé pour réchauffer l'eau courante.



Figure 1.2 : Solaire thermique

#### a. Avantage :

- ✚ Energie renouvelable et bon marché ;
- ✚ Couverture des besoins en chauffage et en électricité.

**b. Inconvénients :**

- ✚ Appoint est toujours nécessaire ;
- ✚ Investissement important.

**1.2.3. Eoliens**

Les éoliens (**aérogénérateurs**) sont des conserveurs mécaniques-électriques qui convertissent la force du vent en électricité, précieuse pour alimenter les sites isolés et l'hydraulique, mais aussi les grands réseaux nationaux (Figure 1.3) [1]. En effet, les éoliennes modernes connaissent un important succès, avec à la clef des progrès technologiques et économiques remarquables depuis ces 20 dernières années. Outre coute, les plus grands industriels sont danois et allemands, ainsi, la moyenne sur les quatre dernières années étant de 30% [1]. Par conséquence, l'électricité éolienne est la moins coûteuse des utilisations actuelles des énergies renouvelables, elle est presque compétitive, comparée à l'électricité issue des énergies traditionnelles.

Des petites éoliennes non productrices pas des courants, sont également utilisées pour pomper l'eau dans les suites isolées en développement ou touchés par de faibles pluviométries



Figure 1.3 : L'éolien.

**a. Avantage [4] :**

- ✚ Energie éolienne ne libère aucun dioxyde de carbone au cours de son cycle de vie ;
- ✚ Il n'y a pas besoin de carburant.

**b. Inconvénients [4] :**

- ✚ Affecte le paysage environnant et cause du bruit ;
- ✚ Dépendant du vent.

### 1.2.4 Hydroélectricité

Des turbines installées sur les cours d'eau utilisent la force électromotrice des chutes pour la production et la génération des électricités. En effet, elle désigne les centrales ne dépassant pas 10MW de puissance (Figure 1.4) [1 ; 5]. En effet, celle-ci est injectée dans les réseaux où alimentent des sites isolés qui n'y sont pas raccordés avec le réseau électrique. De plus, les petites centrales avec les grands barrages et les usines marémotrices forment la filière hydraulique, deuxième source d'énergie renouvelable dans le monde [1 ; 5]. Les installations hydrauliques exploitent l'énergie potentielle mécanique contenue dans un débit d'eau, disponible à un certain niveau par rapport à celui où sont positionnées les turbines. En général, beaucoup d'installations de petites tailles sont réalisées dans des zones de montagnes sur des cours d'eau à régime torrentiel ou permanent et l'introduction du contrôle à distance, de la surveillance à distance et de la commande automatique permet de les utiliser à pleine productivité en économisant sur les coûts de personnel de gestion, qui se limite souvent à l'entretien périodiques, ainsi, le flux minimum vital constitue un élément d'évaluation important pour l'estimation de l'incidence réelle qu'ont les dérivations sur les corps hydriques concernés [1].

En général, les installations mini hydro présentent un impact plus faible que celles de dimensions supérieures car elles s'insèrent à l'intérieur de schémas hydriques déjà existants et donc, éventuellement, déjà caractérisés par un impact limité [1].



Figure 1.4 : Petite hydroélectricité.

**a. Avantage :**

- ✚ Fonctionne comme puissance de régulation ;
- ✚ Il n'y a pas besoin de carburant.

**b. Inconvénients :**

- ✚ Centrales hydroélectriques impliquent une ingérence majeure dans le paysage et affectent les écosystèmes ;
- ✚ Grands investissements sont nécessaires pour construire une centrale hydroélectrique.

**1.2.5 Biomasse**

La biomasse est un terme qui réunit une grande quantité de matériaux, de nature extrêmement hétérogène (Figure 1.5) [6]. En effet, la biomasse utilisable à des fins énergétiques correspond à tous les matériaux organiques pouvant être employés directement comme combustibles, soit transformés en autres substances (solide, liquide ou gazeuse), d'utilisation plus facile dans les installations de conversion [6]. D'autres formes de biomasses peuvent également être constituées par des résidus de cultures destinées à l'alimentation humaine ou animale ou de plantes cultivées seul but énergétique.

L'utilisation des biomasses à des fins énergétiques ne contribue pas à l'effet de serre puisque la quantité de  $\text{CO}_2$  relâché durant la décomposition, ou la conversion énergétique est équivalente à celle absorbée durant la croissance de la biomasse même.

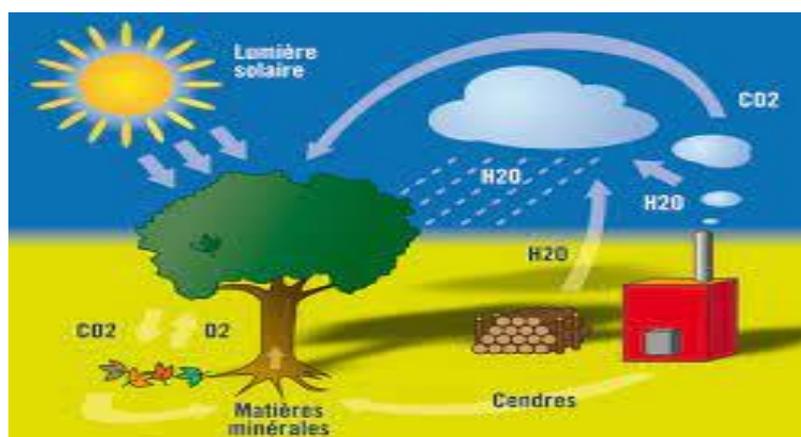


Figure 1.5: Biomasse.

Les déchets de l'agro-industrie, de l'agriculture, des décharges d'ordures ménagères ou des boues provenant des eaux usées peuvent être mis à fermenter pour produire chaleur et électricité.

**a. Avantage :**

- ✚ En utilisant la biomasse dans la production d'électricité au lieu des combustibles fossiles, les émissions de  $\text{CO}_2$  sont considérablement réduites ;
- ✚ Si la biomasse est bien manipulée, elle est neutre en carbone à long terme.

**b. Inconvénients :**

- ✚ Livraison de plus grands volumes difficile à sécuriser ;
- ✚ L'utilisation de la biomasse pour produire de l'électricité est actuellement plus coûteuse que l'utilisation de sources d'énergie telles que le charbon, le gaz et l'énergie nucléaire.

### 1.2.6. Géothermie

L'énergie géothermique est la forme d'énergie due à la chaleur endogène de la Terre (Figure 1.6) [1]. En effet, les volcans, sources thermales et geysers illustrent la présence de chaleur emmagasinée dans la croûte terrestre et qui se dirige vers l'extérieur par le biais de fluides vecteurs tels que l'eau et la vapeur. De plus, la température, à l'intérieur de notre planète, augmente avec la profondeur selon un gradient géothermique de  $3^\circ\text{C}$  par  $100\text{m}$ , même si des zones atteignent des gradients géothermiques anormaux avec des flux de chaleur supérieurs ( $9\text{-}12^\circ\text{C}$  par  $100\text{m}$ ) [1]. Cette énergie thermique, par unité de temps et de surface constitue le flux géothermique et est exprimée en **HFU (Heath Flow Unit)**. L'exploitation de l'énergie géothermique consiste en l'utilisation de la chaleur contenue dans des roches relativement proches de la surface, où elle arrive en se propageant depuis des zones plus profondes de la terre [1].

Dans un système géothermique, l'eau pénètre dans le sous-sol à travers des roches perméables formant des nappes souterraines et, par effet de la chaleur transmise aux roches par une fonte (une masse magmatique), elle se réchauffe jusqu'à atteindre des températures de plusieurs centaines de degrés. Par conséquent, une centrale géo thermoélectrique diffère de celle traditionnelle thermoélectrique par les appareils nécessaires au traitement du fluide naturel provenant du sous-sol et par l'extraction des gaz non condensables (*surtout  $\text{CO}_2$* ) toujours présents dans la vapeur.



Figure 1.6 : L'énergie géothermique.

**a. Avantage :**

- ✚ Solution écologique ;
- ✚ Alternative efficace.

**b. Inconvénients :**

- ✚ Prix de votre installation ;
- ✚ Demande d'expertise.

## 1.3 Batterie

### 1.3.1 Introduction

Le stockage de l'énergie dans les systèmes des énergies renouvelables est généralement assuré par des batteries et cela pour ses différents avantages. La batterie est le principal élément dans les systèmes des énergies renouvelables, par où transite l'énergie électrique fournie par les générateurs.

### 1.3.2 Description d'une batterie

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage d'énergie électrique (Figure 1.7) [7]. De plus, leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus élevée aux bornes du dispositif. En règle générale, une technologie de batterie est définie par le couple des matériaux d'électrodes [8].

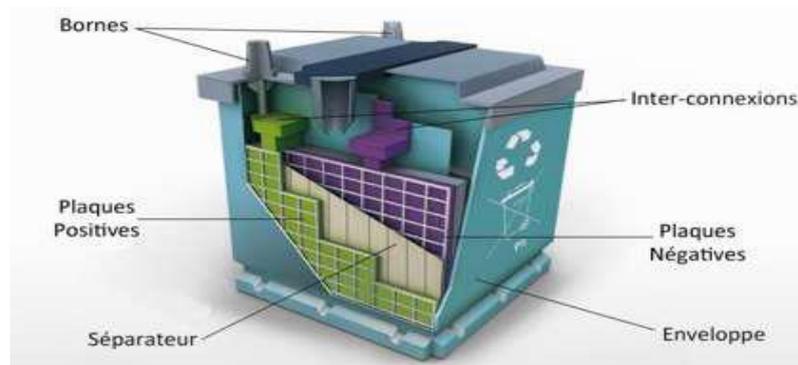


Figure 1.7 : Description de l'intérieur d'une batterie.

### 1.3.3 Différents types de batteries

#### 1.3.3.1. Batterie au Plomb-Acide

Les batteries aux **Plomb-Acide** sont des technologies bien maîtrisée et presque entièrement recyclable (Figure 1.8) [8]. En effet, elle présente l'avantage non négligeable de présenter le prix de revient le plus faible parmi tous les types de batteries connus. Elle joue, vu son ancienneté et sa grande diffusion le rôle d'étalon pour évaluer les caractéristiques des autres batteries.

- **Processus de décharge** : Lors de la décharge, le plomb de l'anode s'oxyde en perdant deux électrons tandis que celui de la cathode en gagne deux lors de sa réduction. L'hydrogène apparu à l'anode et l'oxygène produit à la cathode se recombinent en eau ( $H_2O$ ) ;
- **Processus de charge** : Lors de la charge les réactions inverses des précédentes qui apparaissent car celles-ci sont réversibles. L'eau est alors décomposée à chaque électrode, c'est-à-dire que l'oxygène réagit au pôle positif avec le plomb tandis que l'hydrogène réagit avec l'acide au pôle négatif.



Figure 1.8 : Batteries Plomb-Acide.

**a. Avantage :**

- ✚ Plupart des problèmes initiaux de toute nouvelle technologie ont été résolus il y a plusieurs décennies ;
- ✚ Technologie de batterie robuste et prévisible comme actuellement.

**c. Inconvénients :**

- ✚ Batterie au plomb est lourde en raison de la masse atomique élevée du plomb. (207 par rapport à Lithium 6.9) ;
- ✚ Chargement lent en raison de la chimie inhérente.

**1.3.3.2. Batterie Nickel-Cadmium**

Une batterie **Nickel-Cadmium** ou **Ni-Cd** est un accumulateur électrique rechargeable utilisant de l'hydroxyde de Nickel et du Cadmium comme électrodes (Figure 1.9) [8].

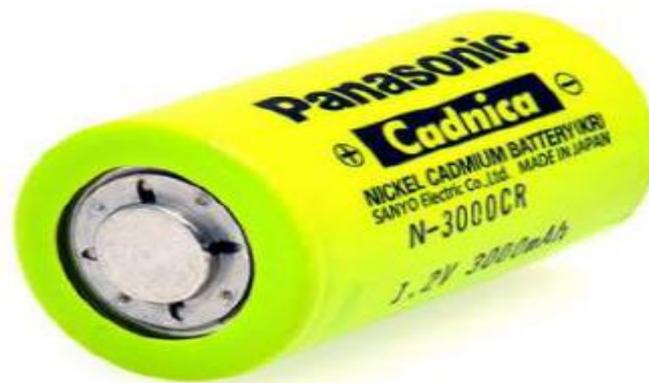


Figure 1.9 : Batterie Nickel-Cadmium (NiCd).

**a. Avantage :**

- ✚ Charge rapide et simple, même après un stockage prolongé ;
- ✚ Bonne performance à basse température.

**b. Inconvénients :**

- ✚ Densité d'énergie relativement faible ;
- ✚ Autodécharge relativement élevée.

**1.3.3.3. Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH)**

Un accumulateur Nickel-Métal Hydrure métallique ou Ni-MH (Nickel-Metal Hydride) est une batterie électrique rechargeable qui utilise de l'hydrure métallique (composé permettant de stocker de l'hydrogène) et de l'Ox Hydroxyde de nickel comme électrode,

comme le montre le Figure 1.10. Elles présentent des caractéristiques très intéressantes, notamment en termes de densité de la puissance et de densité d'énergie [8].



Figure 1.10 : Batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH).

**a. Avantage :**

- + Densité massique supérieure à celle des Nickel-Cadmium ;
- + Simple à stocker et à transporter (l'accumulateur ne contient pas de lithium).

**b. Inconvénients :**

- + Détection de fin de charge complexe ;
- + Durée de vie plus faible que le Nickel-Cadmium en nombre de cycles.

**1.3.3.4. Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)**

L'électrolyte est constitué d'une solution organique ou d'un polymère solide. En effet, la grande légèreté de ce métal autorise l'obtention de densité énergétique extrêmement élevées et la tension de cellule, une densité de puissance importante. Leur coût est 10 fois plus élevé que le Pb (600€/ kWh) et ils ne sont encore utilisés couramment que pour les applications de petites puissances [8].



Figure 1.11 : Batteries lithium-Ion (Li-Ion).

**a. Avantage :**

- ✚ Haute densité énergétique ;
- ✚ Grande intensité de courant.

**b. Inconvénients :**

- ✚ Risque d'incendie ;
- ✚ Sensibilité à la température.

**1.4. Conclusion**

Ce chapitre fait le point des connaissances en matière de systèmes de conversion d'énergie. Nous avons passé en revue les différents types et techniques de production d'énergie renouvelable, ainsi que leurs avantages et inconvénients. En effet, les principaux inconvénients des systèmes d'énergie renouvelable sont leur aspect intermittent et la nécessité de stocker l'énergie produite. De plus, l'utilisation permanente de cette énergie rend nécessaire le stockage d'une partie de l'énergie produite dans des batteries. Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons aux systèmes photovoltaïques.

## Références bibliographiques

- [1] A. ZIGHA « *Étude et simulation d'un système hybride photovoltaïque-éolien* » *Mémoire de Master de l'Université Constantine I. Algérie, 2014*
- [2] M. NADJIB « *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau* » *Mémoire de Magister de l'Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2013.*
- [3] K. HELAL « *Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative,*'' *Mémoire de magister de l'Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2012.*
- [4] T. ESRAM and P. L. CHAPMAN « *Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques*» *IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.*
- [5], K. P. ANGARITA Gil « *Modélisation Électrique et Analyse d'une Cellule Lithium*» *Mémoire de Maîtrise de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2012.*
- [6] O. TREMBLAY, L. DESSAINT, et A .DEKKICHE « *Un modèle de batterie générique pour la simulation dynamique de véhicules électriques hybrides* » *Dans Conférence sur la puissance et la propulsion des véhicules, IEEE, p. 284-289, 2007.*
- [7]. L. GAO, L. SHENGYI et R. A. DOUGAL « *Modèle de batterie lithium-ion dynamique pour la simulation du système. Composants et technologies d'emballage* » *IEEE, vol. 25, no. 3, p. 495-505, 2002.*
- [8]. D. REKIOUA A. HAMIDAT, K. HADDOUCHE, L. KATI « *Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque* », *Colloque National sur l'Energie Solaire ; CNESOL Bejaïa, 2006.*

---

***Chapitre 2 :***  
***Généralité sur les systèmes photovoltaïques***

## Chapitre 2 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

### 2.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (**PV**) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (**GPV**) qui a une caractéristique courant-tension (**I-V**) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries. Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, Le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différentes modèles et les convertisseurs **DC /DC** et la charge et la commande **MPPT**.

### 2.2 Généralités sur les systèmes solaires

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [1]. L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de **3000** h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de **5** à **7** kWh /m<sup>2</sup>/jour [2]. L'Algérie dispose d'environ **3200** heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires.

#### 2.2.1 Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) ou de la fréquence ( $n$ ). Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une

bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ .

La figure(2.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- ✚ 6,4% dans la bande des ultraviolets ( $0,20 < \mu < 0,38 \mu\text{m}$ ) ;
- ✚ 48% dans la bande visible ( $0,38 < \mu < 0,78 \mu\text{m}$ ) ;
- ✚ 45,6% dans la bande des infrarouges ( $0,78 < \mu < 10 \mu\text{m}$ ).

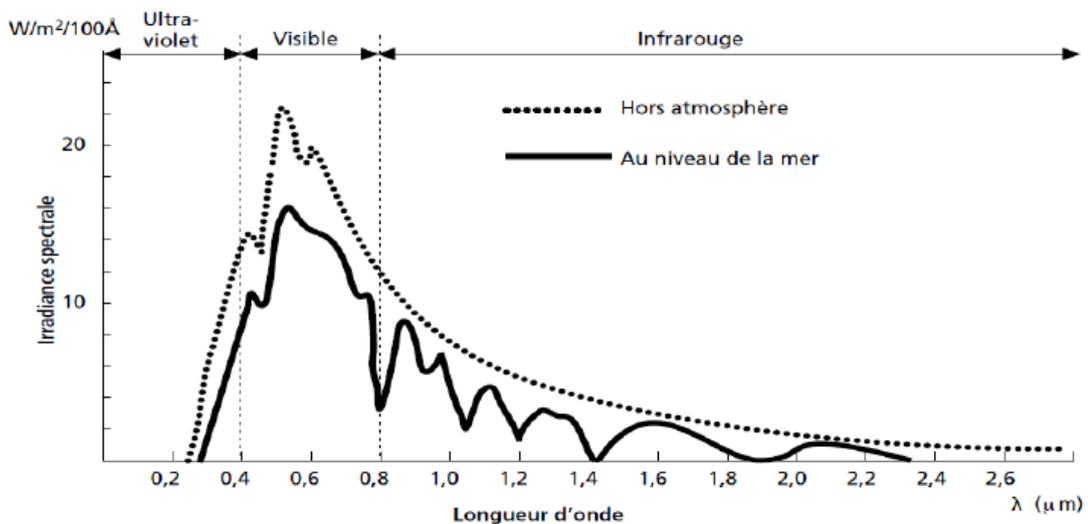


Figure 2.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

### 2.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre.

Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance.

Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius.

Ainsi, à chaque seconde le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous

forme de rayonnement [3].

- + Lumière, à une vitesse de 300000 km/s.
- + Met environ 8 minutes pour parvenir à la terre.
- + Distance moyenne soleil-terre est de 150 million kilomètres.
- + Distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 m.
- + Température de corps noirs à la surface du soleil est d'environ 5780° k [4].
- + Diamètre de soleil  $D=1,39.10^9$  m.

Au sol, le rayonnement a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuage, sol) Sa valeur dépend de la pression, l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiante sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance P ( $W. m^2$ ) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes :

- AM0 : Hors atmosphère (application spatial).  $P = 1.36 \text{ KW}/ m^2$ .
- AM1 : Soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
- AM2 : Spectre standard, le soleil est à 45°.  $P = 1.36 \text{ KW}/ m^2$ .

Les conditions standard de caractérisation sont définis par la norme IEC-609004 de International Electrotechnical commission (IEC) selon une distribution spectrale AM2 globale (la somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100 mW/cm<sup>2</sup> et pour une température de cellule de 25°C [5].

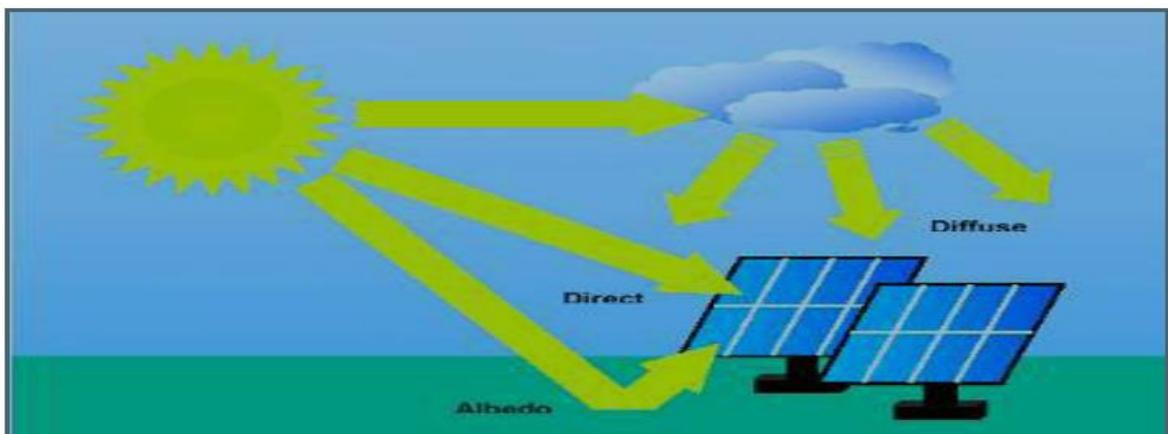


Figure 2.2 : Rayonnement solaire global sur un collecteur photovoltaïque.

### 2.2.3 L'énergie solaire

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. La valeur de l'éclairement est communément prise égale à  $1360 \text{ W/m}^2$ . Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à  $1000 \text{ W/m}^2$  à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet Photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h \cdot C}{\lambda} \quad (2.1)$$

Avec :

- ✚ **h** : Constante de Planck [j. s<sup>-1</sup>].
- ✚ **C** : Vitesse de la lumière [m. s<sup>-1</sup>].
- ✚ **λ** : Longueur d'onde [m].

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [5]. En effet, une façon Commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (2.2)$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm) [6].

## 2.3 Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque

### 2.3.1 Modèle électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure 2.3 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. De plus, ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule [7]:

- ✚ Résistance montée en série ( $R_s$ ) représente la résistance de contacte et de connexion ;
- ✚ Résistance shunt ( $R_{sh}$ ) montée en parallèle représente le courant de fuite ;
- ✚ Diode en parallèle qui modélise la jonction PN.

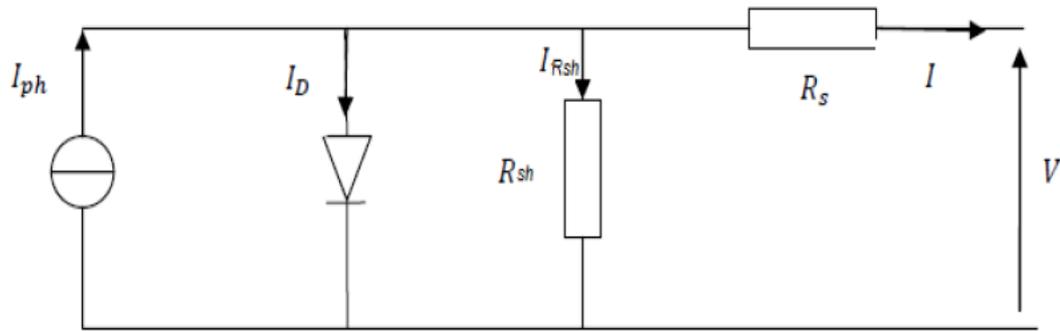


Figure 2.3 : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad \text{Donc} \quad I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (2.3)$$

L'expression résultante à une caractéristique courant-tension (I-V) après tout calcul est :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{v + (I * R_s)}{nV_t}\right) - 1 \right] - \frac{v + (I * R_s)}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Les expressions de ( $I_{ph}$ ) et de ( $I_{sat}$ ) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad (2.5)$$

$$I_{sat} = \left( I_{sc} * \exp\left[\left(\frac{V_{c0}}{n * V_t}\right)\right] - 1 \right) * \left(\frac{T}{298}\right)^3 * \exp\left[\frac{q * E_g * \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)}{n * K}\right] \quad (2.6)$$

Dou :

- ✚  $I_{ph}$ : Photo courant produit.
- ✚  $I_{sat}$ : Courant de saturation de la diode.
- ✚  $R_s, R_{sh}$ : Résistance série et la résistance parallèle, respectivement.
- ✚  $V_t = \frac{KT}{q}$  : Tension thermique a la température T.
- ✚  $q$  : Charge de l'électron ( $1.602 \times 10^{-19}$  C).
- ✚  $K$  : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J / K).
- ✚  $K_i$ : Constante ( $1.2A/cm^2K^3$ ).
- ✚  $n$  : Facteur de non idéalité de la jonction.
- ✚  $T$  : Température effective de la cellule en degré Kelvin.
- ✚  $E_g$ : Energie de gap (pour le silicium cristallin est égale a 1.12 eV).

☀  $G$  : Ensoleillement en  $W/m^2$ .

### 2.3.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes :

#### 2.3.2.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle et  $R_{sh}$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (2.4), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{q(I_{cc} * R_s)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_s)}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible). On peut négliger le terme  $I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{q(I * R_s)}{nKT}\right) - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$ .

L'expression approchée du courant de court-circuit et alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (2.8)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement ( $= I_{ph}$ ).

#### 2.3.2.2 Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ )

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) :

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{q.V}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_t \ln \left[ \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (2.10)$$

### 2.3.2.3 Puissance de la cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique  $P(W)$  disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = VI \quad (2.11)$$

Avec :

- ✚  $P(w)$  : Puissance fournie par la cellule PV.
- ✚  $V(V)$  : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
- ✚  $I(A)$  : Intensité débitée par la cellule PV.

### 2. 3.2.4 Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale  $P_{max}$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :

$$P_{max} = V_{co}I_{cc} \quad (2.12)$$

Avec :

- $P_{max}(W)$ : Puissance fournie par la cellule PV.
- $V_{co}(V)$ : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.
- $I_{cc}(A)$ : L'intensité de court – circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (Figure 2.4), et la tension au point de puissance maximale  $V_{Pmax}$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , de même que le courant fourni  $I_{Pmax}$  est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit.

L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{max} = V_{pmax} I_{pmax} \quad (2.13)$$

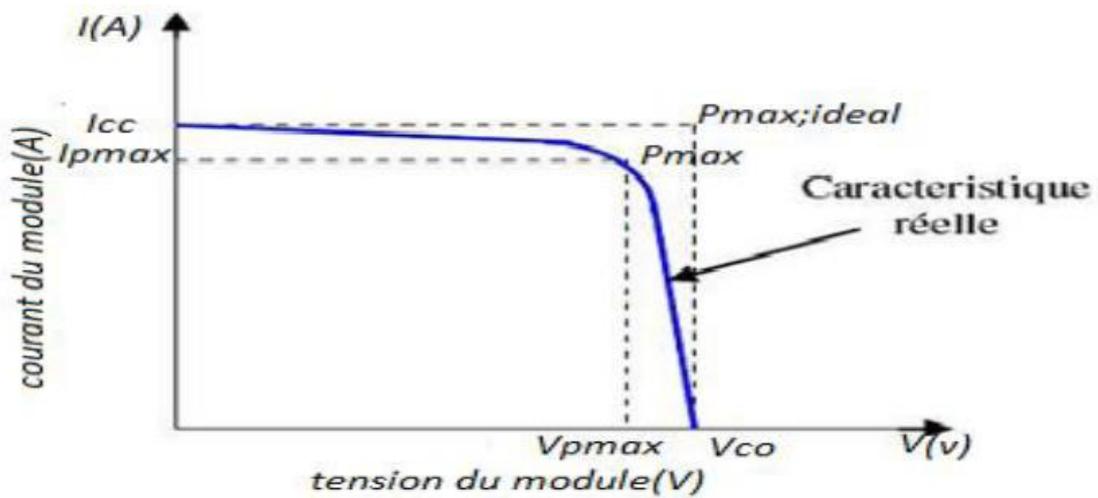


Figure 2.4 : Puissance maximale idéale et pratique.

### 2.3.2.5 Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule ( $I_{opt}$ ) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max}V_{max}}{P_{inc}} \quad (2.14)$$

Avec :  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

### 2.3.2.6 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule ( $I_{max, max}$ ) et le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC}V_{c0}} = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{cc}V_{c0}} \quad (2.15)$$

## 2.4 Comportement d'un générateur photovoltaïque

De par sa constitution, un générateur PV aura un comportement plus ou moins optimisé et pourra ainsi produire plus ou moins de puissance comme nous avons pu le constater dans une première analyse faite au paragraphe précédent.

L'objectif ici dans cette étude est de montrer l'influence de certains paramètres extérieurs telle que (l'ensoleillement ou irradiation, la température) sur le GPV.

### 2.4.1 Influence de l'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. En effet, le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire  $I_{cc}$  proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_{co}$  et donc un décalage du point  $P_{max}$  du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent les caractéristiques  $P(V)$  et  $I(V)$  respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ( $T=25^{\circ}C$ ) et un ensoleillement variable.

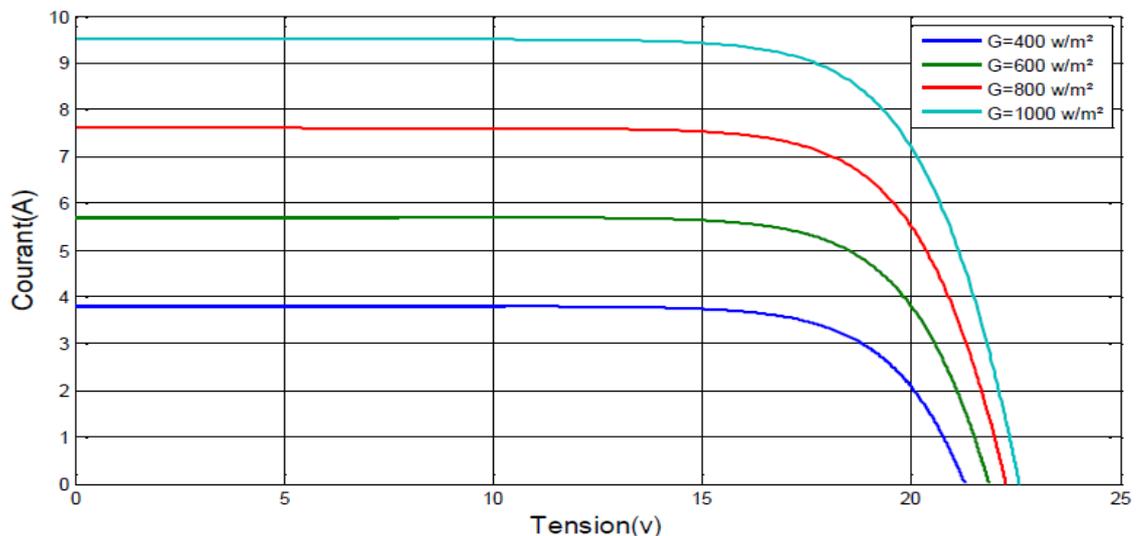


Figure 2.5 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$  [8].

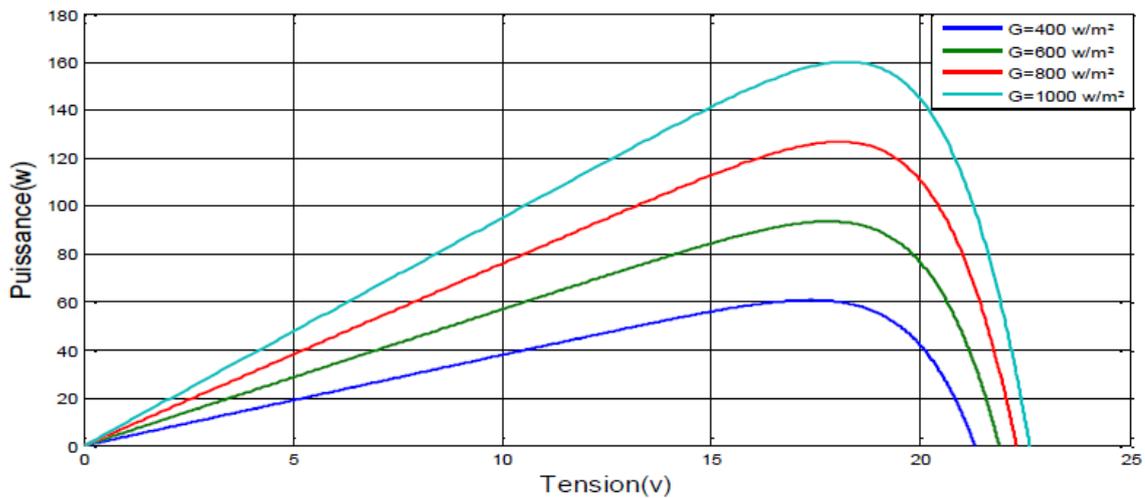


Figure 2.6 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=f(V)$  [8].

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique donc que :

- ✚ Puissance optimale de la cellule est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- ✚ Points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

#### 2.4.2 Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $75^{\circ}\text{C}$  et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV.

Les graphes suivant représentent des courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

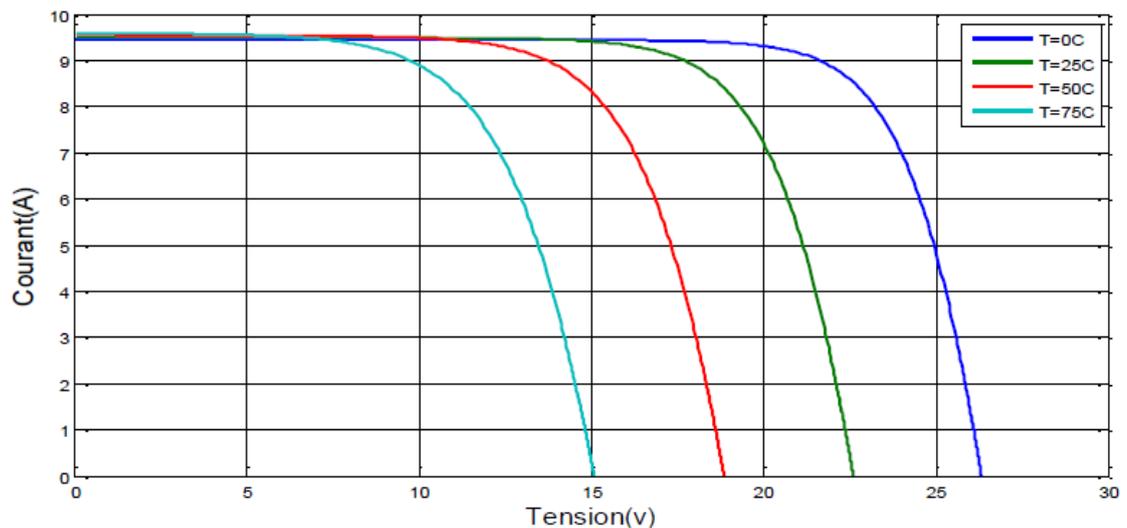


Figure 2.7 : L'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$  [8].

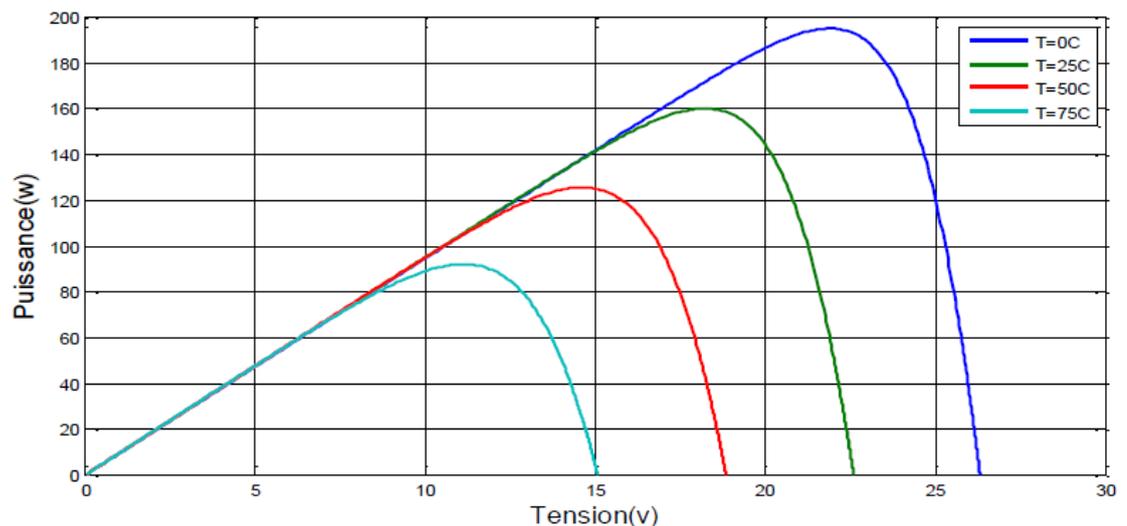


Figure 2.8 : L'influence de la température sur la caractéristique  $P=f(V)$  [8].

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de **0,5%** par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de **25 °C**.

## 2.5 Charge

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements (télécommunication, moteur à courant continu...) ou bien de type alternatif dans les cas d'usage domestique (maison solaire) ce cas nécessite un onduleur.

Dans notre travail on utilise un moteur à courant continu qui serve comme une charge électrique alimentée par un système photovoltaïque [PV](#).

## 2.6 Commande MPPT

### 2.6.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque ([GPV](#)) peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique [I\(V\)](#) du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont, connus sous le nom [MPPT](#) (Maximum Power Point Tracking) c'est-à-dire poursuite du point à puissance maximale, associées à la commande de l'hacheur, les quelles assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les techniques de commande [MPPT](#) sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches.

Dans [ce chapitre](#), on présentera plusieurs méthodes de commande [MPPT](#) basées sur la poursuite du point de puissance maximale [PPM](#).

Notre travail est basé sur le développement de la méthode perturbation et observation ([P&O](#)). Cette commande utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

### 2.6.2 Définition de la commande MPPT

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur de la commande **MPPT** est utilisé pour la commande de l'hacheur [9]. La technique de suivi **MPPT** a été développée depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque [10]. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque.

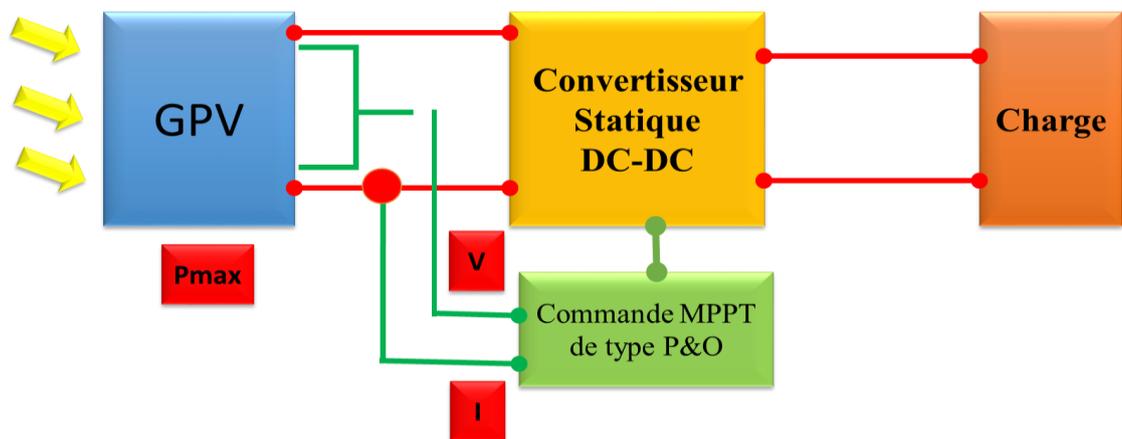


Figure 2.9 : Schéma de principe du convertisseur statique.

### 2.7 Algorithme Perturbation et Observation

L'algorithme Perturbation et Observation (**P&O**) est largement utilisé parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètres de mesure, pour l'utiliser on considère que le **PV** fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le **MPP**.

La méthode **P&O** fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau  $V_{pv}$  avec un  $\Delta V$  et on observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du **PV**.

- ✚ Si  $\Delta P > 0$  alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du **MPP** et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du **MPP**.
- ✚ Si  $\Delta P < 0$  le point de fonctionnement s'éloigne du **MPP** alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du **MPP**.

Sur la (Figure B.3) on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP, du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa, si la valeur de l'éclairement augmente la courbe P(V) du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B1 ce si nous amène à  $\Delta P > 0$  avec  $[\Delta P = P(k) - P(k-1)]$  le MPPT continu à perturber les tensions dans la même direction c'est-à-dire vers le point B2.

Si l'éclairement augmente toujours, le point de fonctionnement se déplace vers le point C1 de la courbe (3) au lieu du point B2 sur la courbe (2) alors le MPPT a toujours  $\Delta P > 0$  et il déplace le point de fonctionnement vers le point C2.

A partir des points A  $\rightarrow$  B1  $\rightarrow$  C1  $\rightarrow$  C2 l'algorithme P&O continu à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminué.

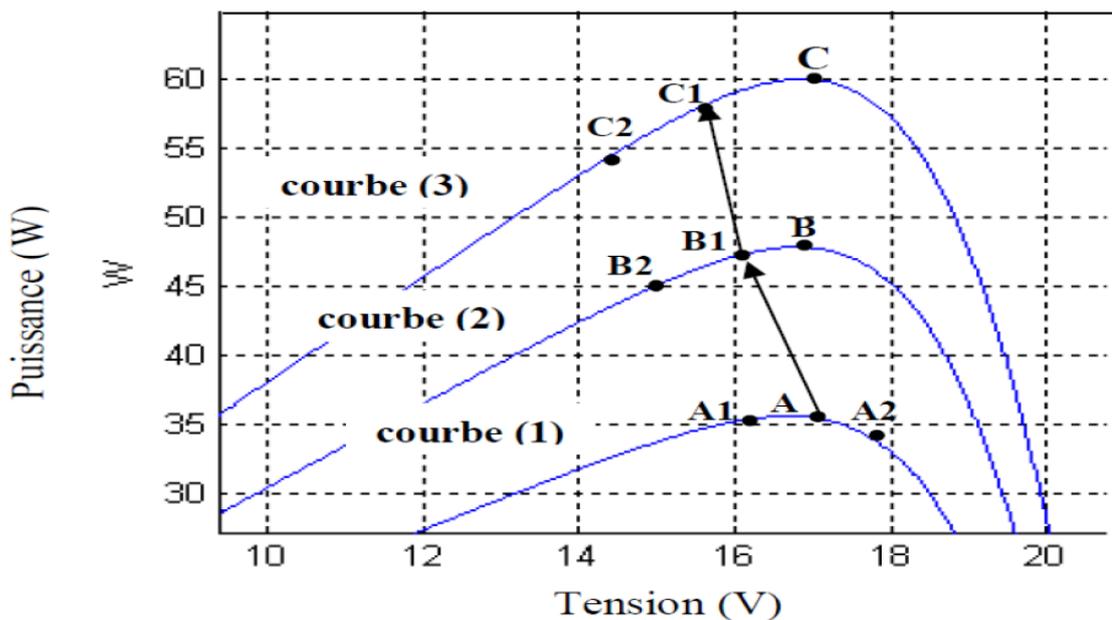


Figure 2.10 Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.

2.7.1 Organigramme Perturber et Observer

La figure 2.18 illustre l’organigramme de la commande MPPT de type P&O. Pour déterminer la puissance à chaque instant, deux capteurs sont nécessaires pour mesurer les valeurs de la tension et du courant [9].

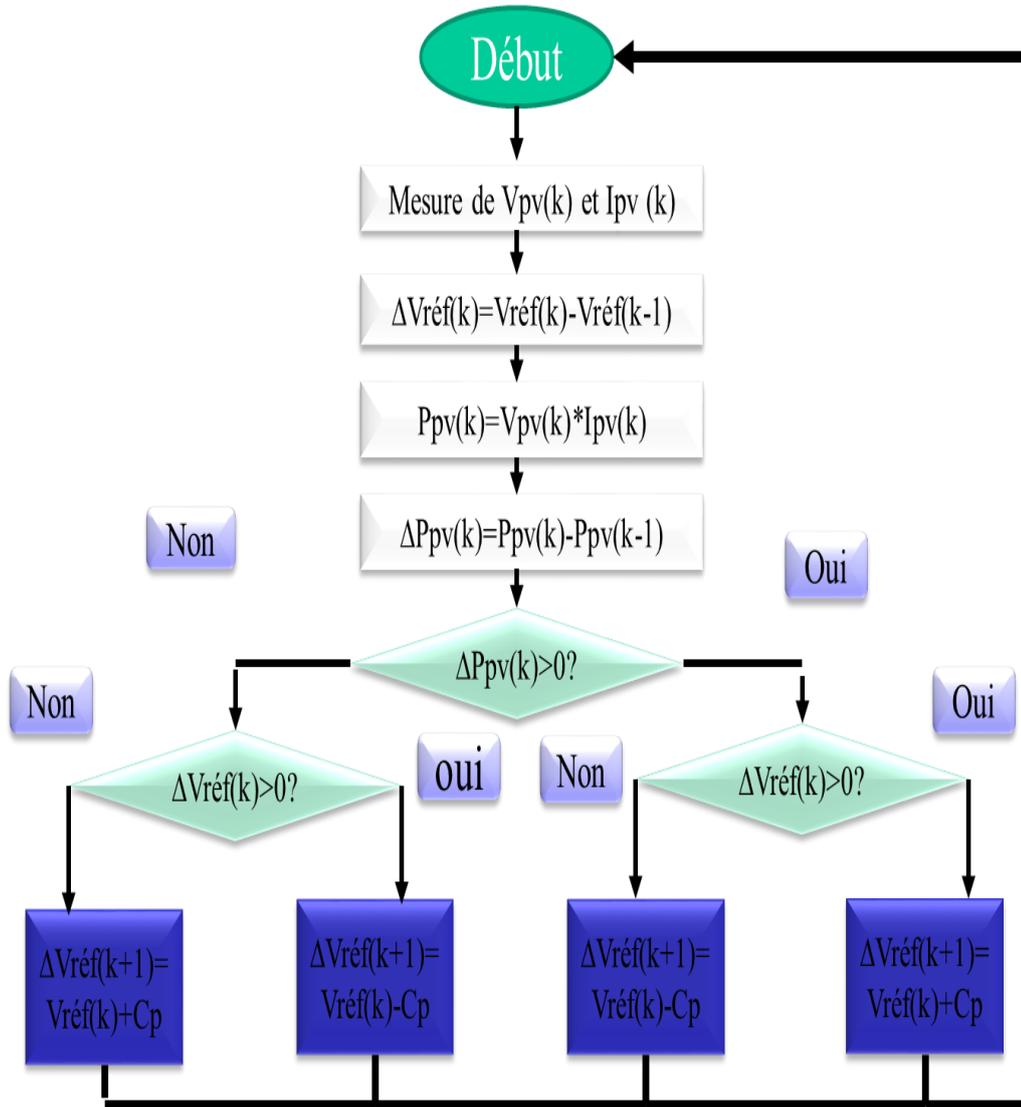


Figure 2.11 Algorithme de la méthode P&O (Cp est la largeur du pas de perturbation).

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée bien qu’elle présente des problèmes d’oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM.

En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d’interprétation dans la direction qu’il faut suivre

pour atteindre le PPM.

## 2.8 Convertisseur DC-DC (hacheur)

La Figure 2.12 montre la représentation d'un convertisseur *DC/DC*, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [11].

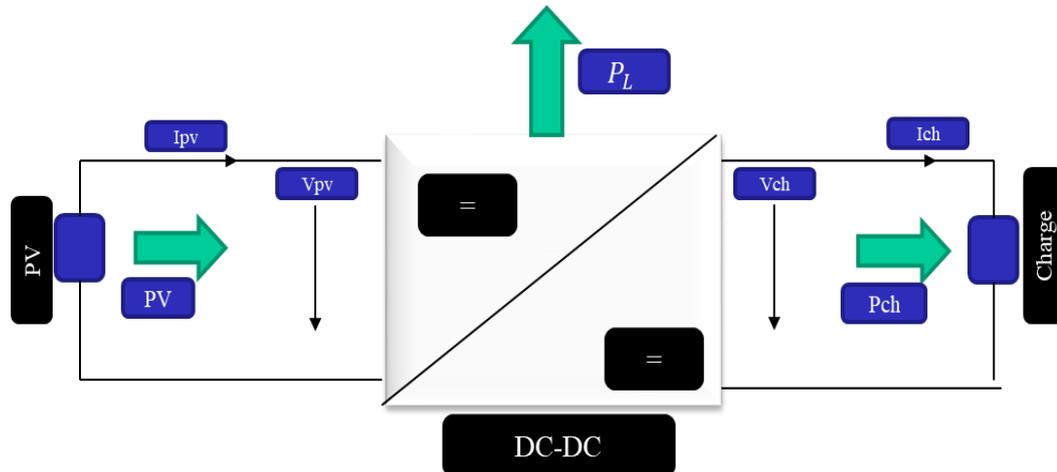


Figure 2.12 : Convertisseur DC/DC.

Le rôle du convertisseur *DC/DC* (dans le cadre du *PV*) est de faire l'adaptation entre la source (*GPV*) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant la puissance fournie sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.). Contrairement au cas général où le convertisseur *DC/DC* est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt plu la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande. Si les pertes internes  $P_L$  du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales. Il existe plusieurs types des convertisseurs *DC-DC*.

Parmi les quels, on présente le principe des trios types de convertisseur à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les déférentes charges.

### 2.8.1 Hacheur dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom d'hacheur Buck ou hacheur série. La Figure 2.13 présente le schéma de principe du convertisseur

dévolteur [12]. De plus, son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M = \frac{V_o}{V_i}$  change avec le rapport cyclique du commutateur.

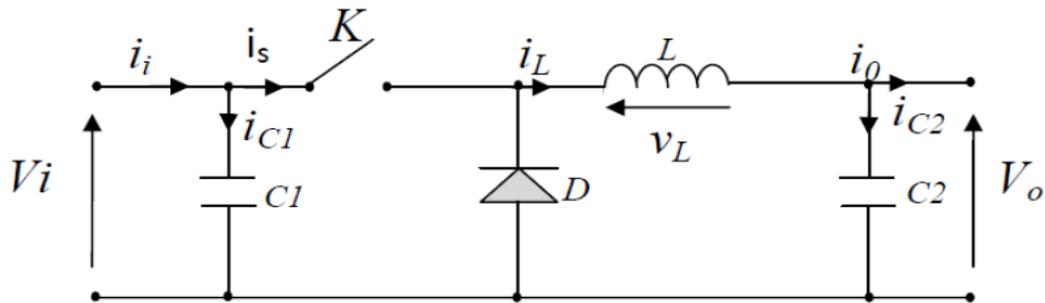


Figure 2.13 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur (Buck).

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La (figure 2.14) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant  $d \cdot T_s$  et l'interrupteur ouvert pendant  $(1-d) \cdot T_s$ .

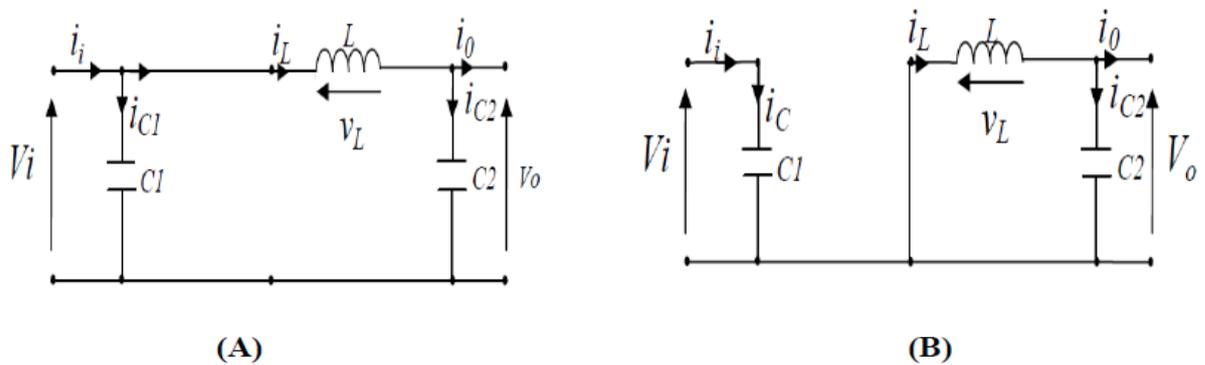


Figure 2.14 : Schémas équivalents de l'hacheur dévolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la Figure 2.14, on obtient les systèmes d'équations suivants : Pour la première période  $d \cdot T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (2.16)$$

Pour la deuxième période  $(1 - d).T_s$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_0(t) \end{cases} \quad (2.17)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) T_s = \frac{dx}{dt_{D.T_s}} d.T_s + \frac{dy}{dx} (1 - d).T_s \quad (2.18)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.16) et (2.17), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_L) + (1 - d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} T_s = dT_s(i_L - i_0) + (1 - d)T_s(i_L - i_0) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = dT_s(V_i - V_0) + (1 - d)T_s(-V_0) \end{cases} \quad (2.19)$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ i_0(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{di_L(t)}{dt} + V_0(t)) \end{cases} \quad (2.20)$$

### 2.8.2 Hacheur survolteur (Boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe de base est celui de la Figure 2.15. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [12].

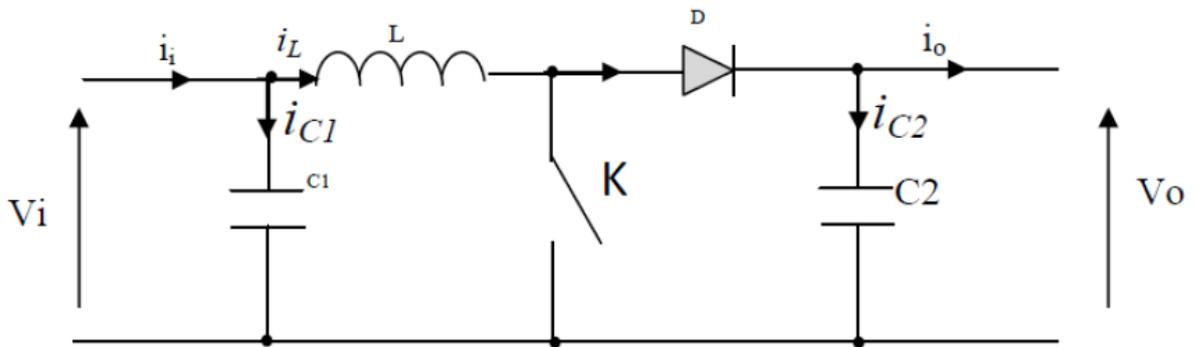


Figure 2.15 : Schéma de principe d'un convertisseur (Boost).

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (Figure 2.16) des deux phases de fonctionnement donne [12] :

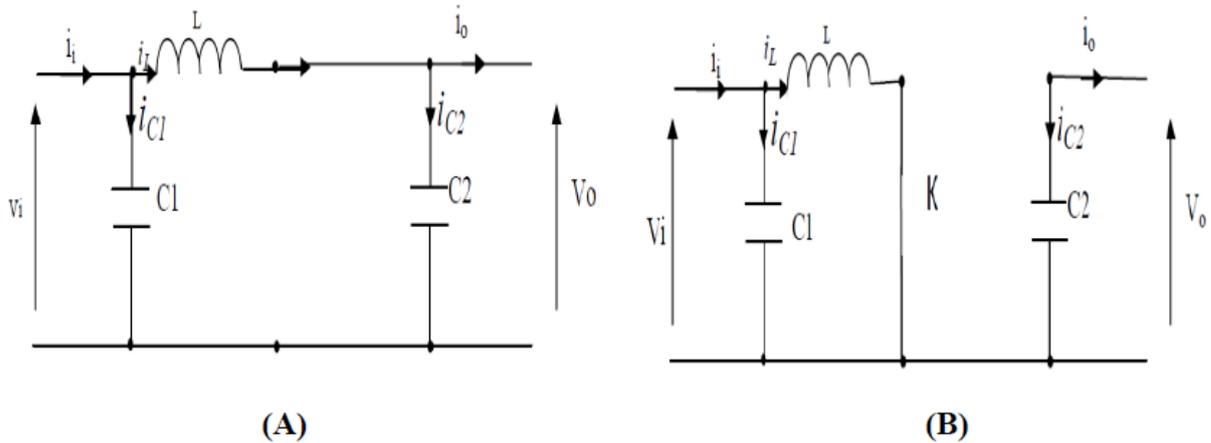


Figure 2.16 : Schémas équivalents de l'hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert.

❖ Pour la première période  $d.T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (2.21)$$

❖ Pour la deuxième période  $(1 - d).T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (2.22)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.21) et (2.22), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [12] :

$$\begin{cases} i_L(t) = i_1 - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_o(t) = (1 - d)i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1 - d)V_o(t) \end{cases} \quad (2.23)$$

### 2.8.3 Hacheur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée, son schéma de base est illustré par la Figure 2.17 [12]:

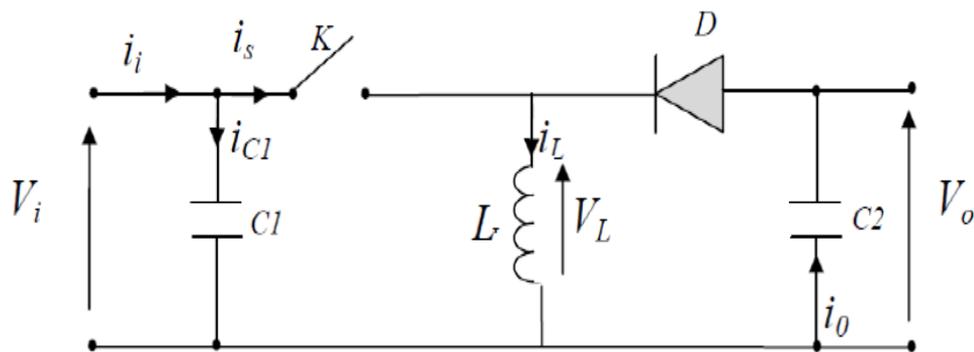


Figure 2.17 : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur.

La Figure 2.18 montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [12].

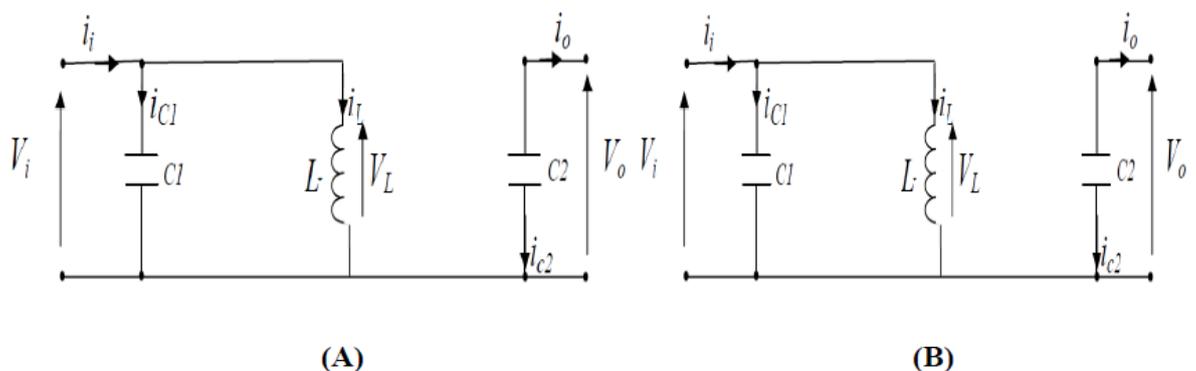


Figure 2.18 : Schémas équivalents du l'hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert.

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

❖ Pour la première période  $d.T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (2.24)$$

❖ Pour la deuxième période  $(1-d).T_s$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_0(t) \end{cases} \quad (2.25)$$

En appliquant la relation (2.3) sur les systèmes d'équations (2.24) et (2.25), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur [11]:

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{d} \left( i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\ i_0(t) = -(1-d)i_L(t) - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_i(t) = \frac{1}{d} \left( -(1-d)V_0(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} \right) \end{cases} \quad (2.26)$$

## 2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons représenté les différentes cellules du système de panneaux photovoltaïques, en commençant par les cellules solaires, le hacheur dévolteur-survolteur. Nous avons ensuite montré comment optimiser la puissance fournie par le GPV via un étage d'adaptation avec une fonction de recherche de point de puissance maximale de type P&O. Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation des différents composants du système.

## Références bibliographiques

- [1] K. KASSMI et M. HAMDAOUI et F. OLIVIE « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique » *Mémoire Magister de l'Université de Maroc, revue des énergies renouvelables*, pp. 451-462, 2007.
- [2] D. BOUKHERS « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » *Mémoire de Magister de l'Université de Constantine*, 2007.
- [3] O. GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » *Thèse de doctorat en électrotechnique de l'École Normale Supérieure de Cachan*, 2002.
- [4] H. BOUZERIA « Modélisation et commande d'une chaîne de conversion photovoltaïque » *Thèse de doctorat 3ème cycle LMD de l'Université Hadj Lakhdar Batna*, 2016.
- [5] A. FERRAI « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village » *Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale Polytechnique, Alger*, 2008.
- [6] M. DERBAL, N. DEBBAH « Étude et Commande d'un Système Hybride Eolien Photovoltaïque Connecté au Réseau avec Stockage. Contribution à l'Amélioration de la Qualité de l'Énergie » *Mémoire du projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'Etat de l'École Nationale Polytechnique d'Alger*, 2013.
- [7] B. AZOUI et al, "Sizing and Optimization models for photovoltaic pumping system Using BLDCM Motor", *AMSE*, pp 55-69, 2003.
- [8] Tarfaya Y et Siad H .2019. Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans Un système PV. *Mémoire De Master, Université Badji Mokhtar Annaba*.
- [9] M. JAOUEN « Les énergies renouvelables Etat des lieux et perspectives en Italie » ». *Chargée de Mission Cathy RACAULT, Attachée Scientifique ; Juin 2005*.
- [10] N. Touil et S. Ghenbazi « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque » *Mémoire de Master académique de l'Université Chahid Hama Lakhdar d'El-Oued*, 2015.
- [11] A. DJALAB « Diagnostic des défauts d'un système d'énergie renouvelable basée sur les techniques d'intelligence artificielle : Application sur un système photovoltaïque » *Thèse de doctorat de l'Université de Djelfa*, 2020.
- [12] K. SOBAIHI « étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction » *Mémoire de Magister de l'Ecole Nationale polytechnique, Alger*, 2014.



***Chapitre 3 :***  
***Modélisation et commande d'un système***  
***PV-Batterie-MCC***

## Chapitre 3 : Modélisation et commande d'un système PV-Batterie-MCC

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation et la commande de la machine à courant continu alimentée par un panneau photovoltaïque PV, afin de choisir une méthode permettant de réaliser cette commande tout en satisfaisant aux contraintes normatives et agricoleur d'une application pour l'hydraulique. Ce choix orientera fortement la suite de notre aspect.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation et la commande d'une machine à courant continu alimentée par un panneau photovoltaïque. Nous essayons de choisir une méthode permettant de réaliser cette commande tout en satisfaisant les contraintes normatives pour une application d'hydraulique.

### 3.2 Modélisation de la machine a courant continu

Les machines à courant continu sont des convertisseurs de l'énergie électromécanique réversible, elle peut fonctionner soit en moteur électrique qui convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice qui convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique (Figure 3.1) [1].

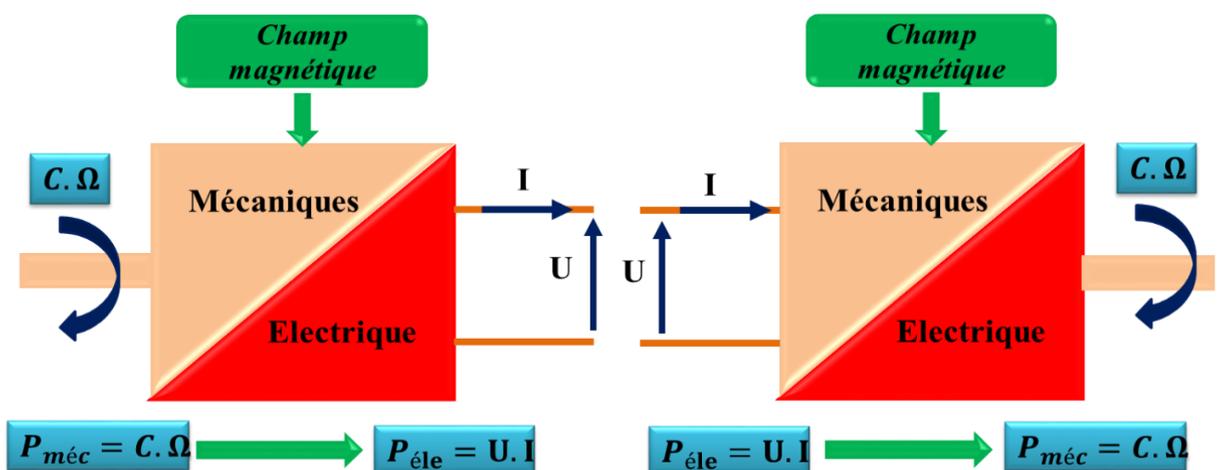


Figure 3.1 : Convertisseur énergies réversible.

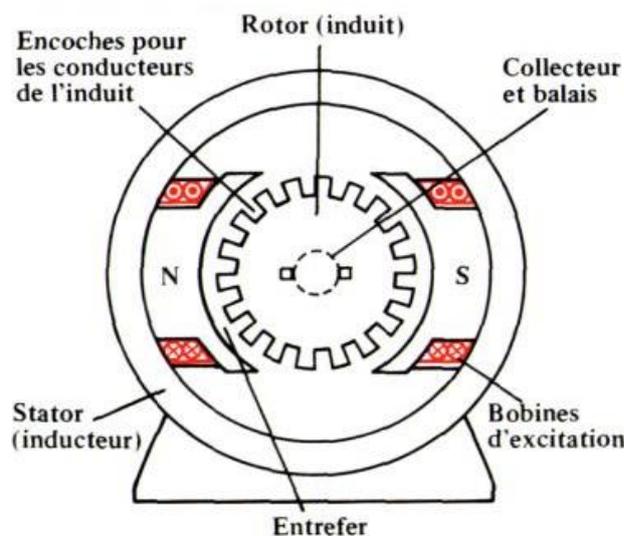
Dans les deux types du champ magnétique sont nécessaire aux différentes conversions. De plus, comme les moteurs à courant continu sont fabriqués en très

grandes quantités dans le cadre d'un processus entièrement automatisé, ils sont très bon marché. Dans la plupart des cas, des ferrites bon marché sont utilisées à la place des aimants néodyme-fer-bore afin de maintenir les coûts de fabrication à un niveau bas.

### 3.3 Principe de fonctionnement de moteur à courant continu

La machine à courant continu se compose plusieurs parties, comme le montre sur la Figure 3.2 [2] :

- ✚ Partie fixe : l'**inducteur** qui aura le rôle du **stator** ;
- ✚ Partie mobile : l'**induit** qui aura le rôle du **rotor** ;
- ✚ Liaison induit-éléments extérieurs à la machine appelée **collecteur**.



**Figure 3.2** : Schéma des principes éléments d'une machine à courant continu.

#### 3.3.1 L'inducteur

L'**inducteur** d'une machine à courant continu est le corps constant de la **MCC**. Il se compose principalement les éléments suivants :

- ✚ Carcasse ;
- ✚ Paliers ;
- ✚ Flasques de palier ;
- ✚ Portes balais.

Le cœur même de la machine comprend essentiellement les éléments suivants :

- Ensemble de paires de pôles constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques.
- Bobinage destinés à créer le champ ou les champs magnétiques suivant le nombre de paires de pôles.

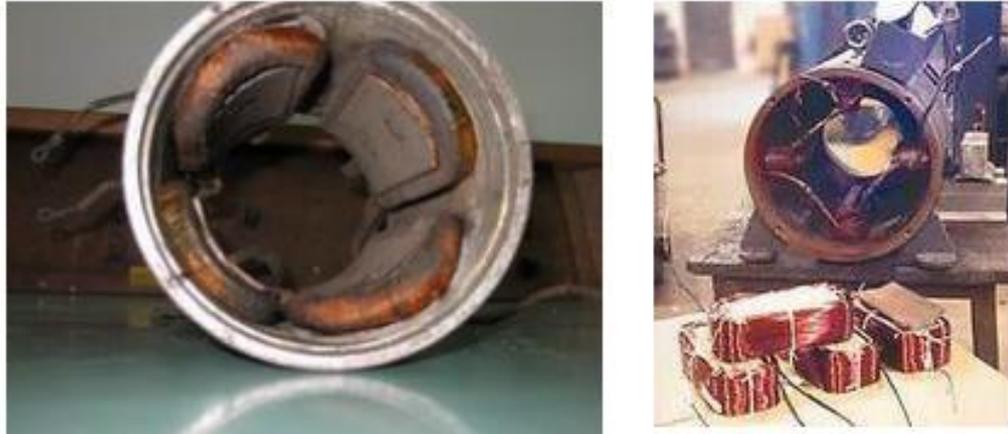


Figure 3. : L'inducteur de la MCC.

### 3.3.2 L'induit

L'induit de la MCC est composé d'un arbre sur lequel est empilé un conjointement de disques ferromagnétiques, comme le montre sur la Figure 3.4. En effet, des encoches sont axialement pratiquées à la périphérie du cylindre formé par les disques empilés. Dans ces encoches les enroulements (bobines de l'induit) sont "bobinés" selon un schéma très précis et complexe qui nécessite une main d'œuvre particulière (coûts importants) [3].



Figure 3.4 : L'induit de la MCC.

Chaque enroulement est composé d'une série de sections, elles même composées de spires ; une spire étant une boucle ouverte dont l'aller est placé dans une encoche de l'induit et le retour dans l'encoche diamétralement opposée. Pour que l'enroulement soit parcouru par un courant, ses conducteurs de départ et de retour sont connectés aux lames du collecteur (cylindre calé sur l'arbre et composé en périphérie d'une succession de lames de cuivre espacée par un isolant).

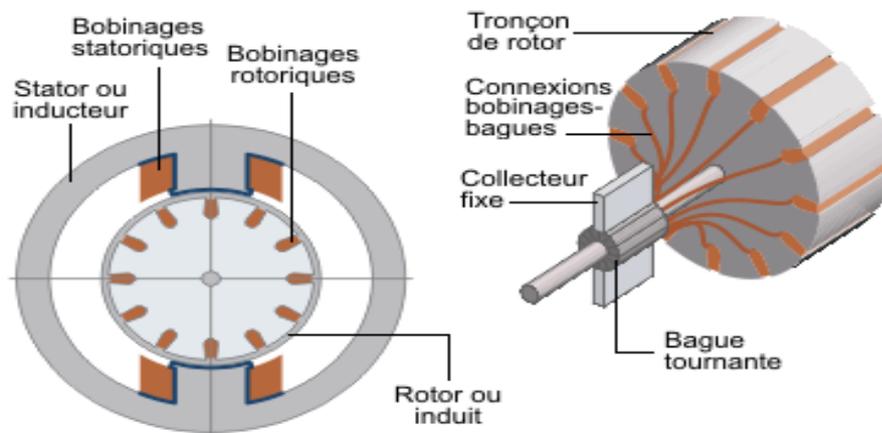


Figure 3.5 : Composition de l'induit de la MCC.

L'interface entre l'alimentation à CC et le collecteur de l'induit est assurée par les balais et les porte-balais.

### 3.3.3 Les balais

Les balais fournissent le passage de l'alimentation par le courant électrique entre l'alimentation et les enroulements de l'induit sous forme d'une connexion par frottement. Les balais sont en graphite et constituent, en quelques sortes, la pièce d'usure. Le graphite en s'usant libère une poussière qui rend la MCC sensible à un entretien correct et donc coûteux.

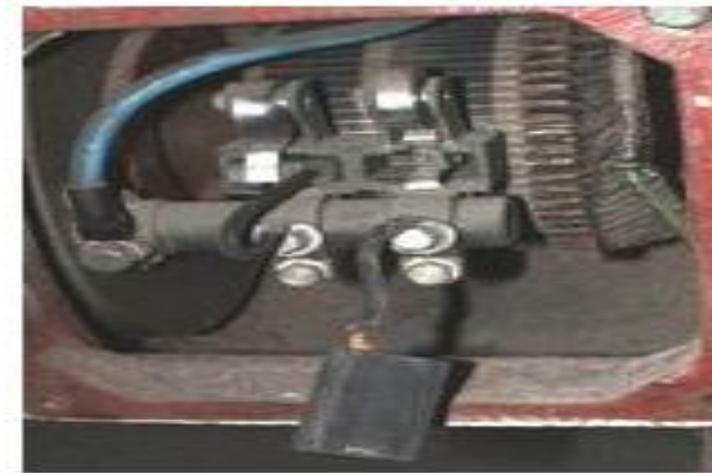


Figure 3.6 : L'ensemble des porte-balais et collecteur de la MCC.

Le point de contact entre le collecteur et les balais compose le point faible de la MCC. En effet, c'est à cet endroit, qu'outre le problème d'usure du graphite, la commutation (inversion du sens du courant dans l'enroulement) s'opère en créant des micros-arcs (étincelles) entre les lamelles du collecteur ; un des grands risques de dégradation des collecteurs étant leur mise en court-circuit par usure [4].

### 3.4 Types des MCC [5]

Les MCC se spécifient par la manière dont on fournit le courant d'excitation. Les différents types sont :

#### 3.4.1 MCC à Excitation série

Le circuit d'excitation est placé avec l'induit de la MCC. Sa particularité est d'avoir un inducteur qui est traversé par le même courant l'induit, outre cout, l'inducteur possède donc une résistance plus faible que celle des autres types des machines. De plus, l'induit est en série avec l'inducteur : une seule source d'alimentation satisfait. On change le sens de rotation en permutant les connexions de l'induit et de l'inducteur. Le circuit électrique est montré par la Figure 3.7 [5].

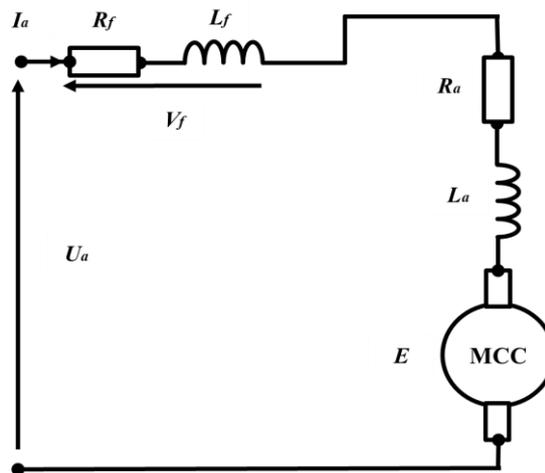


Figure 3.7 : Modèle électrique équivalent de la MCC à excitation série.

### 3.4.2 MCC à Excitation parallèle

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle sur l'alimentation de la machine, il possède les mêmes propriétés que la MCC à excitation séparée du fait que, dans les deux cas, l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est montré par la Figure 3.8[5].

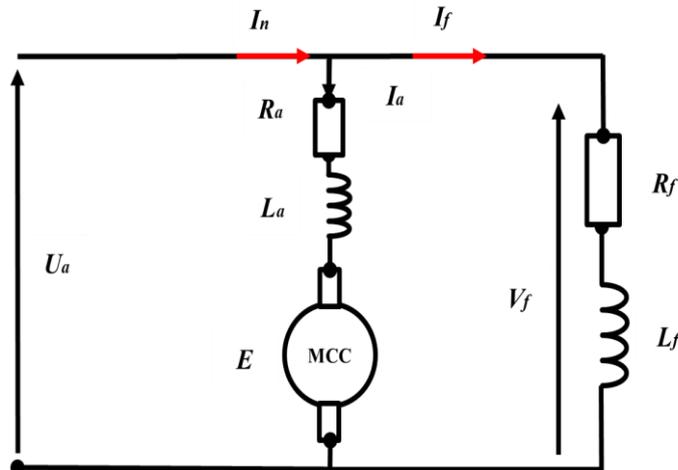


Figure 3.8 : Schéma électrique équivalent de la MCC à excitation parallèle.

### 3.4.3 MCC à excitation indépendant

La MCC à excitation sépare nécessite deux sources d'alimentations distinctes. L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale. On change le sens de rotation en permutant les bornes de l'induit ou de l'inducteur. Le circuit électrique est représenté par la Figure 3.9 [5].

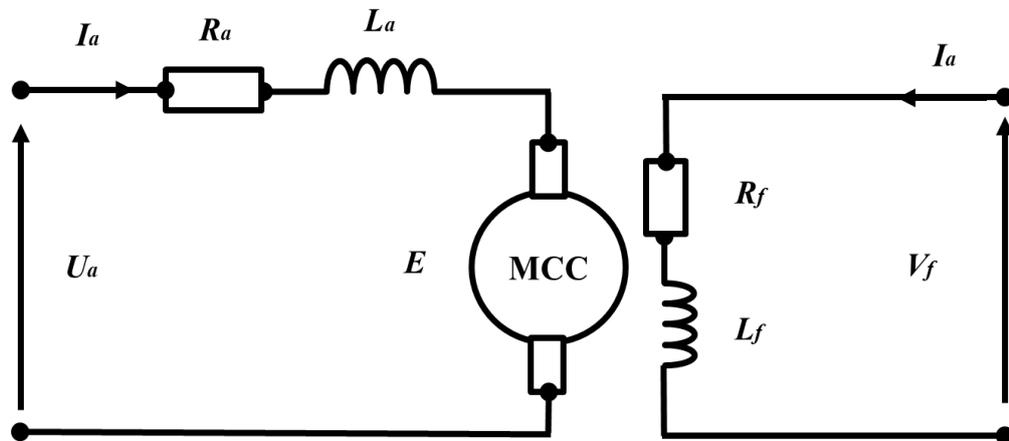


Figure 3.9 : Schéma électrique d'une MCC à excitation séparée.

### 3.5 Modélisation mathématique d'une MCC [6]

Selon le schéma de la Figure 3.10, une machine à courant continu est régit par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques [6].

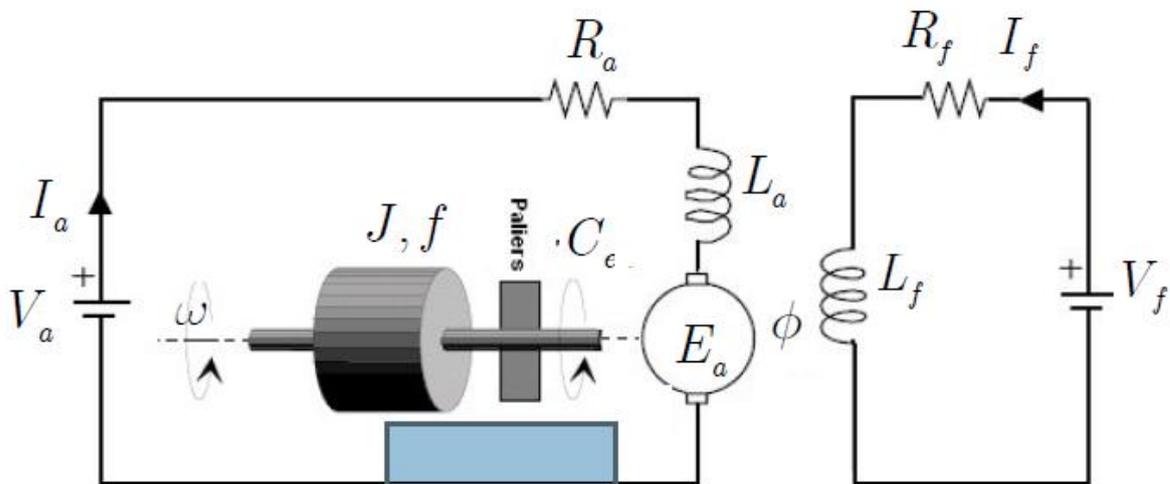


Figure 3.10 : Schéma électrique d'une machine à excitation séparée.

D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, On peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes :

#### 3.5.1. Equation de l'inducteur (excitation) :

$$L_f \frac{dI_f}{dt} = -R_f I_f + V_f \quad (3.1)$$

#### 3.5.2. Equation de l'induit :

$$L_a \frac{dI_a}{dt} = -R_a I_a - E_a + V_a \quad (3.2)$$

Où :

$$E_a = K\Phi\omega \quad (3.3)$$

Avec  $\omega$  vitesse de rotation en radians/seconde.

Le flux est une fonction linéaire du courant d'excitation :

$$k\Phi = M I_f \quad (3.4)$$

### 3.5. 3. Equation de couple :

On l'obtient à partir de la puissance électromagnétique :

$$P = C_e \omega = I_a E_a = I_a k \omega \quad (3.5)$$

Ce qui donne :

$$C_e = k I_a \Phi = M I_f I_a \quad (3.6)$$

### 3.5.4. Equation mécanique :

$$J \frac{d\omega}{dt} = -f\omega + C_e - C_r \quad (3.7)$$

Où  $C_r$  est le couple résistant imposé par la charge, le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et le frottement proportionnel à la vitesse de rotation.

### 3.5.5. Position du rotor :

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3.8)$$

Pour la simulation de la machine on utilisera les équations suivantes :

$$L_f I_f = -R_f I_f + V_f \quad (3.9)$$

$$L_a I_a = -R_a I_a + M I_f \omega + V_a \quad (3.10)$$

$$\dot{\theta} = \omega$$

$$J \dot{\omega} = -f\omega + M I_f I_a - C_e \quad (3.11)$$

### 3.6 Schéma bloc de la MCC au niveau de Matlab/Simulink

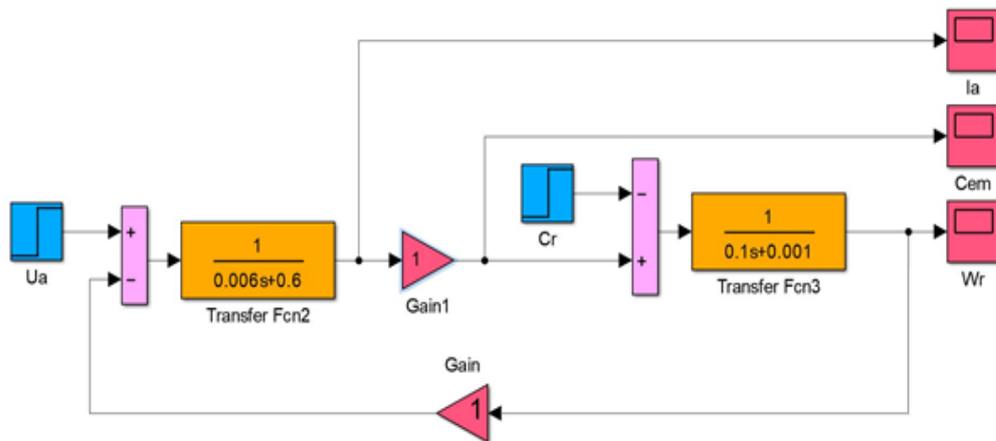


Figure 3.11 : Schéma de la MCC au niveau de *MATLAB/SIMULINK*.

### 3.7 Résultats de la simulation

#### 3.7.1 Simulation de la MCC sans commande

Les Figures 3.12 et 3.13 suivantes représentent les résultats de la simulation de la machine MCC sans commande :

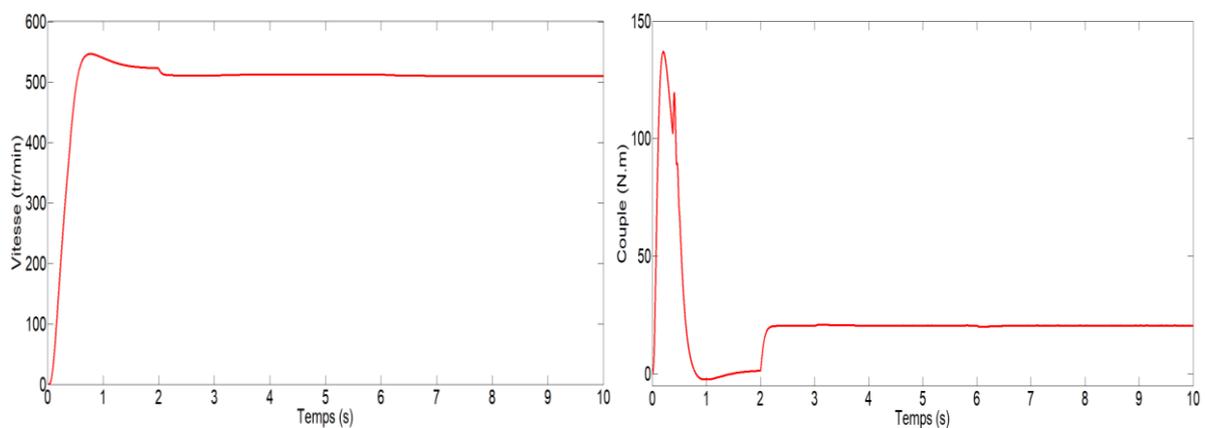


Figure 3.12 : Allures des grandeurs électromécaniques de la vitesse et le couple de la machine MCC Sans commande.

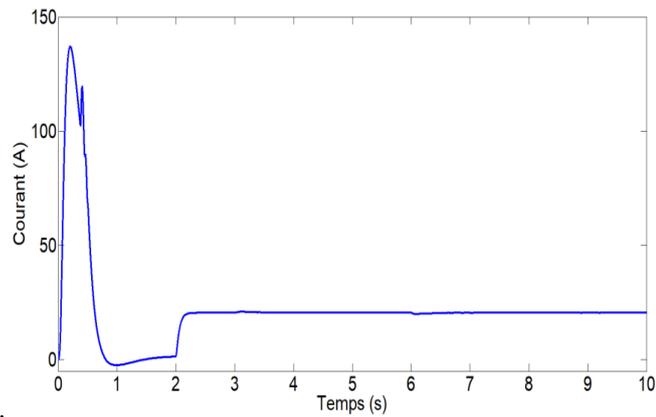


Figure 3.13 : Allure de grandeur électrique des courants de la machine MCC sans commande.

### 3.7.2 Simulation de la MCC avec commande PI

Les Figures 3.12 et 3.13 suivantes représentent les résultats de la simulation de la machine MCC avec régulateur PI (Schéma bloc de la régulateur PI au niveau de Matlab/Simulink dans Annexe C) :

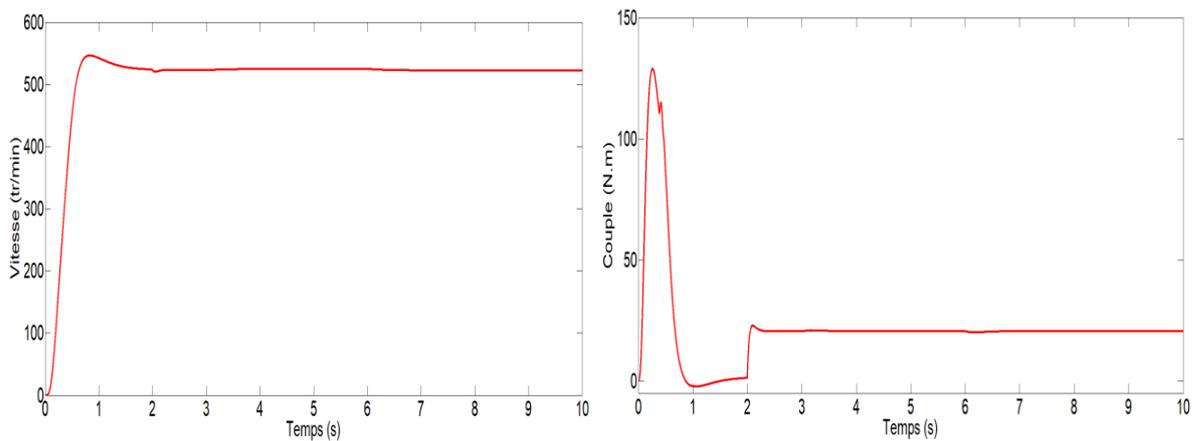


Figure 3.14 : Allures des grandeurs électromécaniques de la vitesse et le couple de la machine MCC avec régulateur PI.

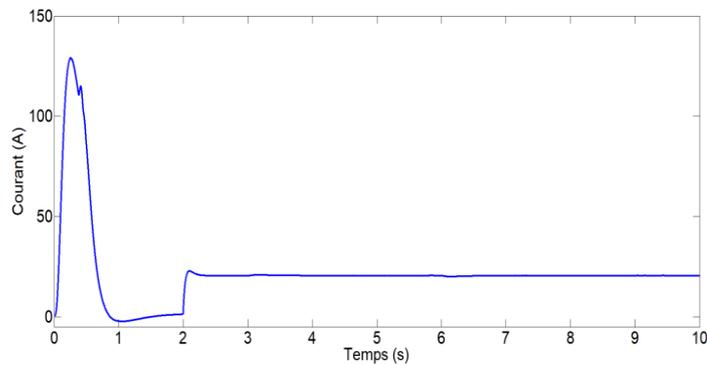


Figure 3.15 : Allure de grandeur électrique des courants de la machine MCC avec régulateur PI.

Les figures 3.12 - 3.13 - 3.14 - 3.15 - 3.16 et 3.17 représentent les courbes du courant, du couple et de la vitesse pour différentes étapes du fonctionnement d'un moteur à courant continu. On remarque bien que les caractéristiques (courant-couple -vitesse) expriment des forts appels pendant le démarrage (le courant et le couple observent un pic de valeur importante qui égal presque 125A pour le courant et 125N.m pour le couple).

La réponse du courant aura la même réponse de couple parce que nous avons  $C_e=K.I$  (Le couple est l'image de courant). Pour l'allure de vitesse on remarque bien qu'elle est d'une forme apériodique durant le régime transitoire, puis elle se stabilise à la vitesse à vide en régime permanent.

### 3.8 Schéma bloc de la commande du système GPV-Batterie-MCC sous Matlab/Simulink

La figure 3.16 donne le schéma block de notre système photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés : batterie, Buck\_Boost\_convertter, enter roulacie\_convertter, PV, bus contenu, commande batteries, commande Boost, bloc des mesures et machine DC.

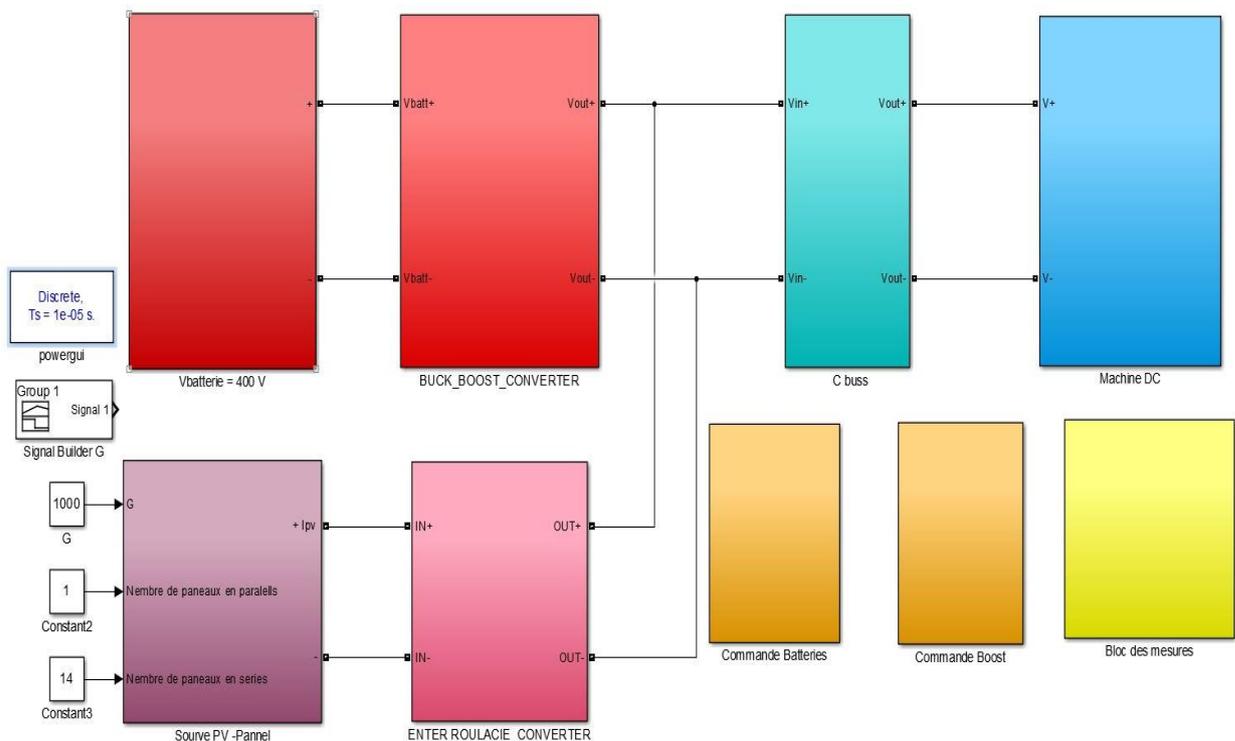


Figure 3.16 : Schéma de la commande du système GPV-Batterie-MCC sous Matlab/Simulink.

**✚ Fonctionnement avec des conditions constantes :**

Nous allons simuler le fonctionnement d'un ensemble GPV-Batterie-MCC avec des conditions atmosphériques fixes éclairement  $G=1000W/m^2$  et une température  $T= 25C ^\circ$ . Les Figures suivantes représentent, respectivement, les évolutions des grandeurs électriques et mécaniques du système.

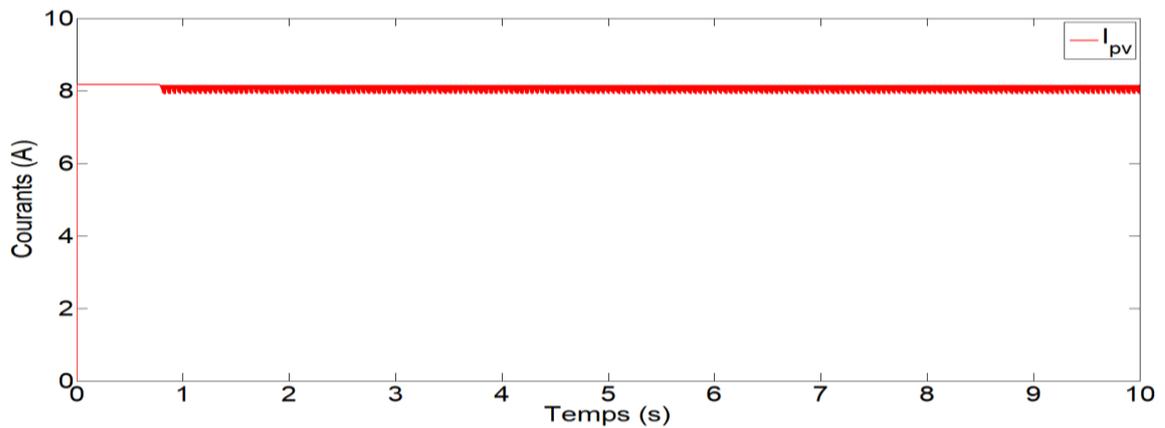


Figure 3.17 : Allures du courant de GPV (G =1000 ; T=25°C).

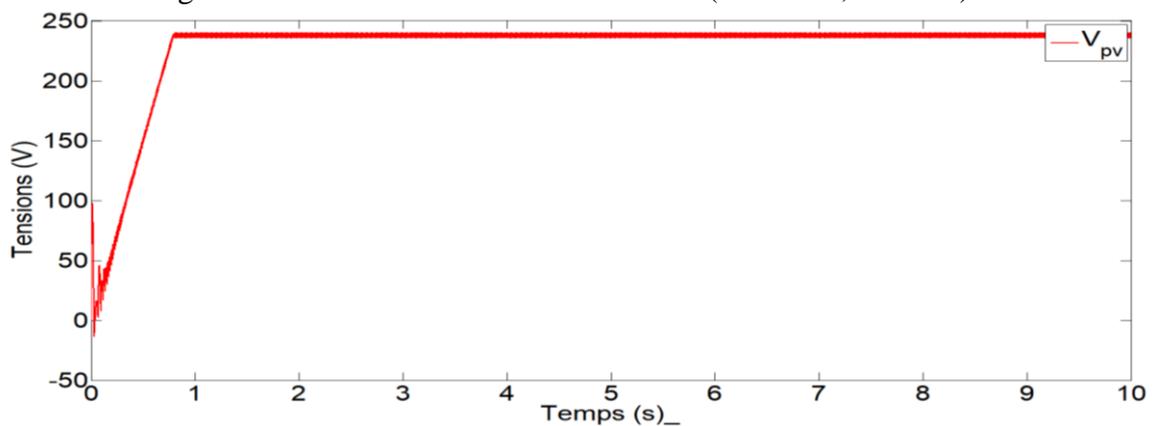


Figure 3.18 : Allure de la tension de GPV (G =1000 ; T=25°C).

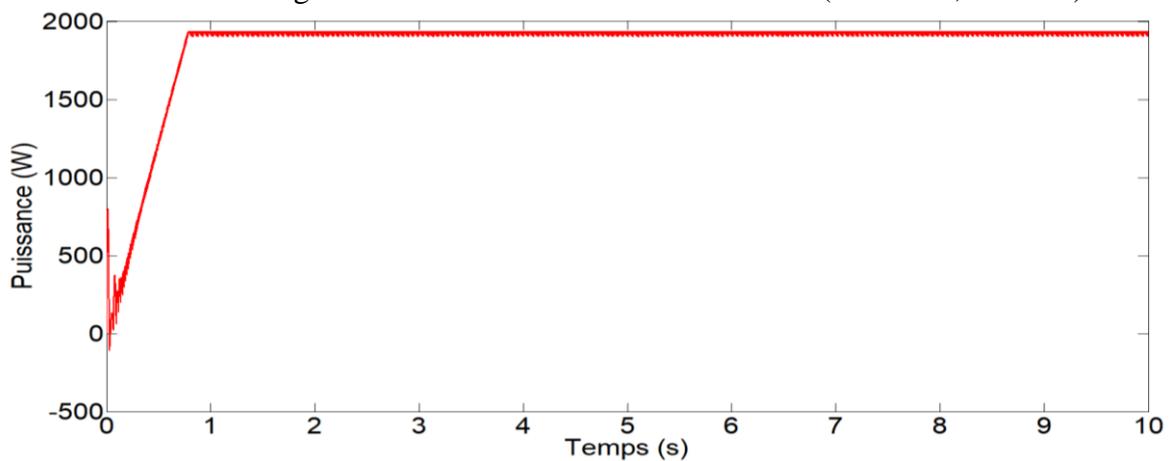


Figure 3.19 : Allure de la puissance GPV (G =1000 ; T=25°C).

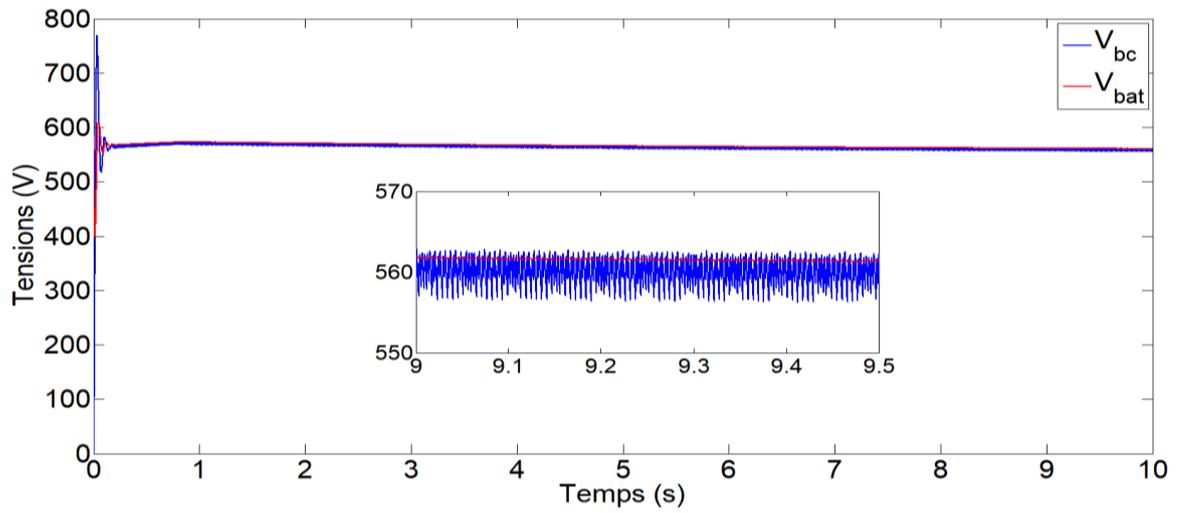


Figure 3.20 :Allure des tensions, de batterie et du bus contenu ( $G = 1000$  ;  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).

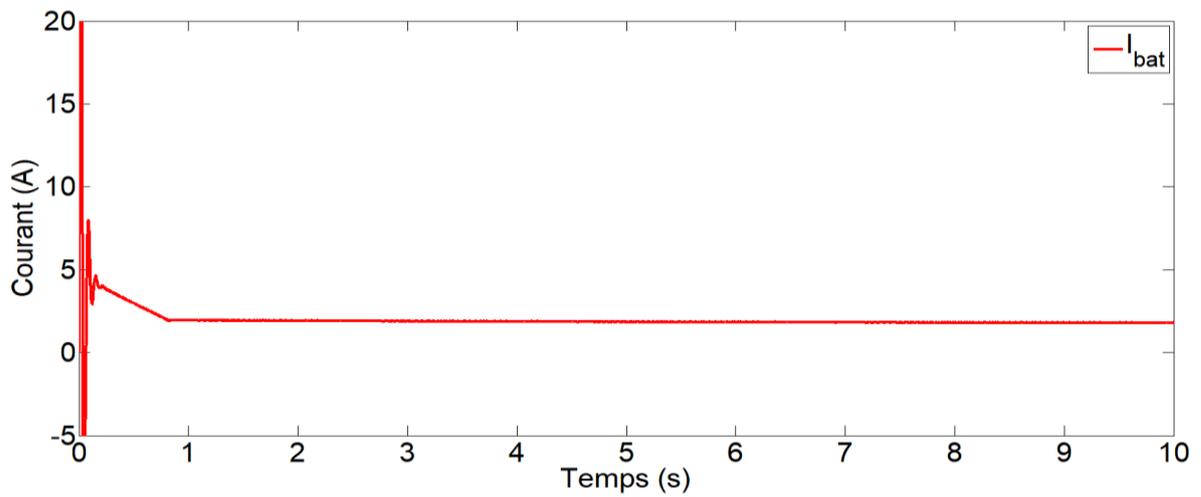


Figure 3.21 :Allure du courant de batterie ( $G = 1000$  ;  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).

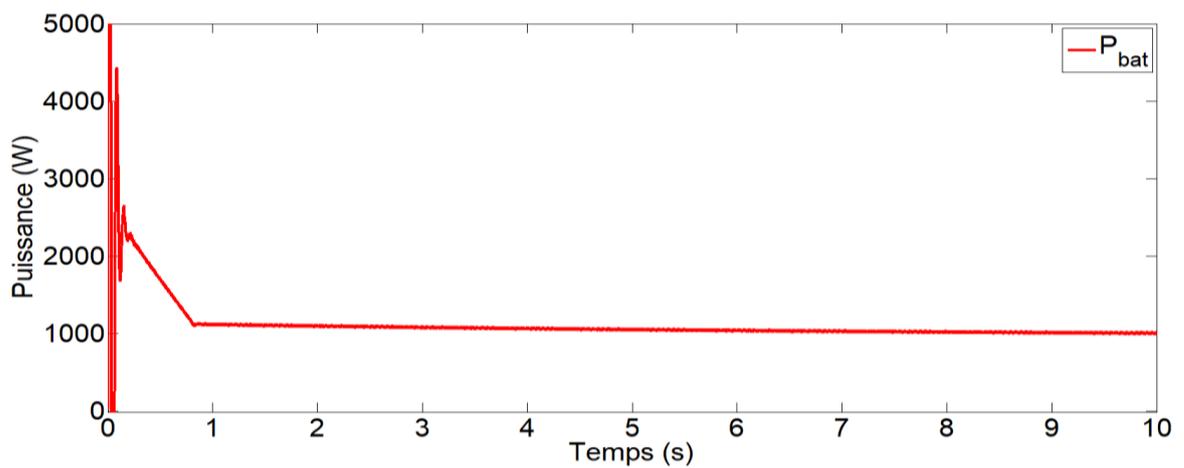


Figure 3.22 : Allure de la puissance de batterie ( $G = 1000$  ;  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).

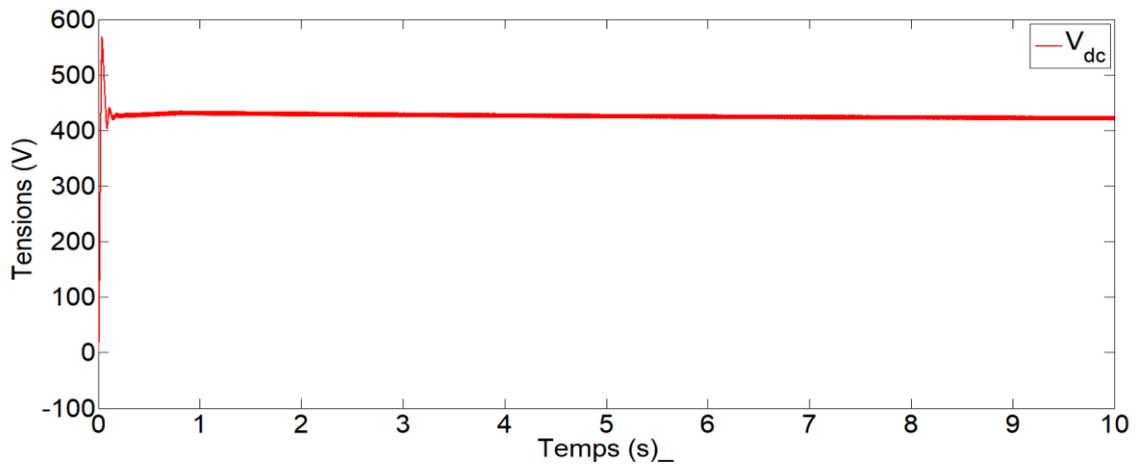


Figure 3.23 : Allure de la tension de source ( $G = 1000$  ;  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).

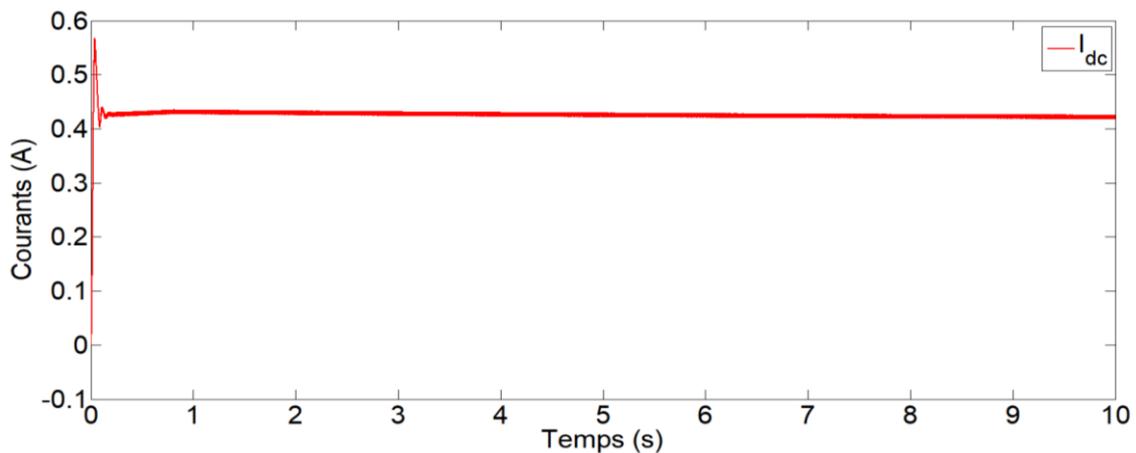


Figure 3.24 : Allure du courant de source ( $G = 1000$  ;  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).

Les résultats de simulation obtenus sont présentés dans les figures 3.17 à 3.24. Elles montrent que la commande MPPT de type P&O permet de retrouver le point de puissance maximale PPM du générateur panneau photovoltaïque GPV. On remarque que les réponses de tension, du courant et de la puissance pressentons sur les Figures 3.17 à 3.24 atteignent les valeurs suivantes :  $V_{GPV} = 273\text{V}$   $I_{GPV} = 8.16\text{A}$  et  $P_{GPV} = 1335\text{W}$  avec des faibles oscillations. À partir des courbes présentées pour les différents cas de simulation, on remarque que l'hacheur Boost a fourni une tension de sortie  $V_{dc} = 576\text{V}$  supérieure à celle GPV. Donc l'hacheur Boost effectue correctement son rôle dans le cas du fonctionnement avec l'éclairement fixe ou variable, on note que la commande MPPT a un rendement très important dans le but de poursuivre le PPM.

### ✚ Test robustesse de l'éclairement

Nous avons vérifié la performance du système GPV-Batterie-MCC étudié sous une température fixe  $T=25^{\circ}\text{C}$  et un éclairement variable  $G=800\text{W}/\text{m}^2$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $G=700\text{W}/\text{m}^2$ , comme le montre le profil de l'éclairement.

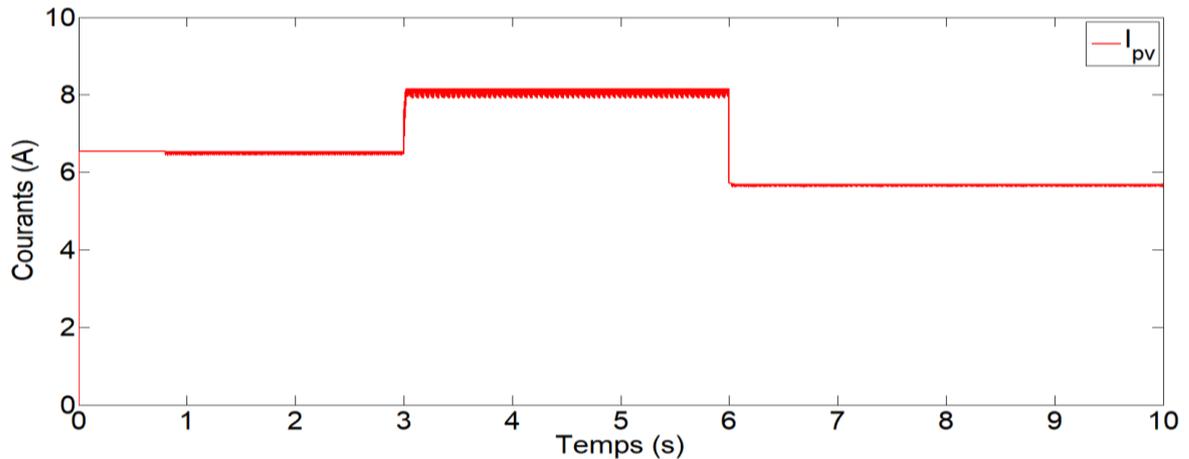


Figure 3.25 : Allure du courant de GPV ( $G_1=800$  ;  $G_2=1000$  ;  $G_3=700$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

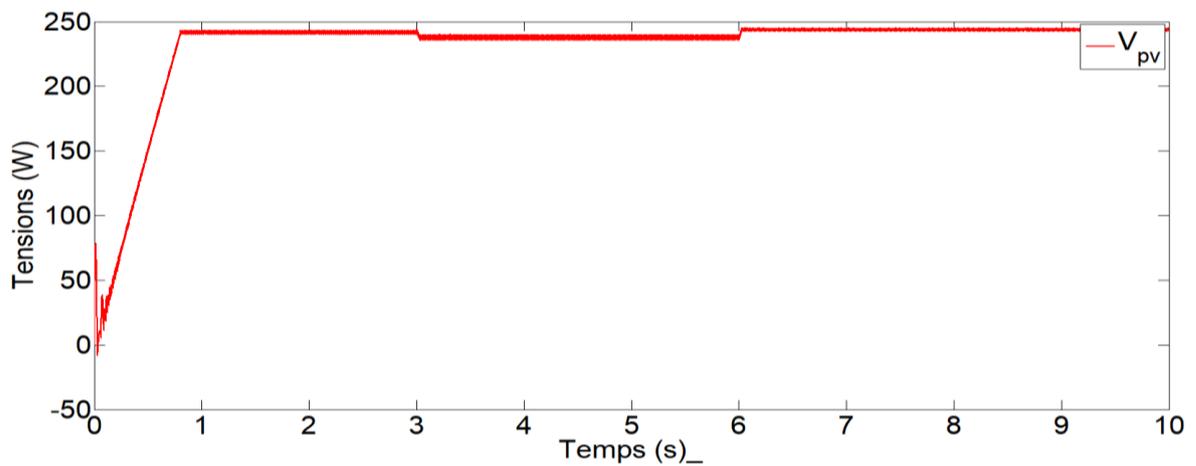


Figure 3.26 : Allure de la tension de GPV ( $G_1=800$  ;  $G_2=1000$  ;  $G_3=700$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

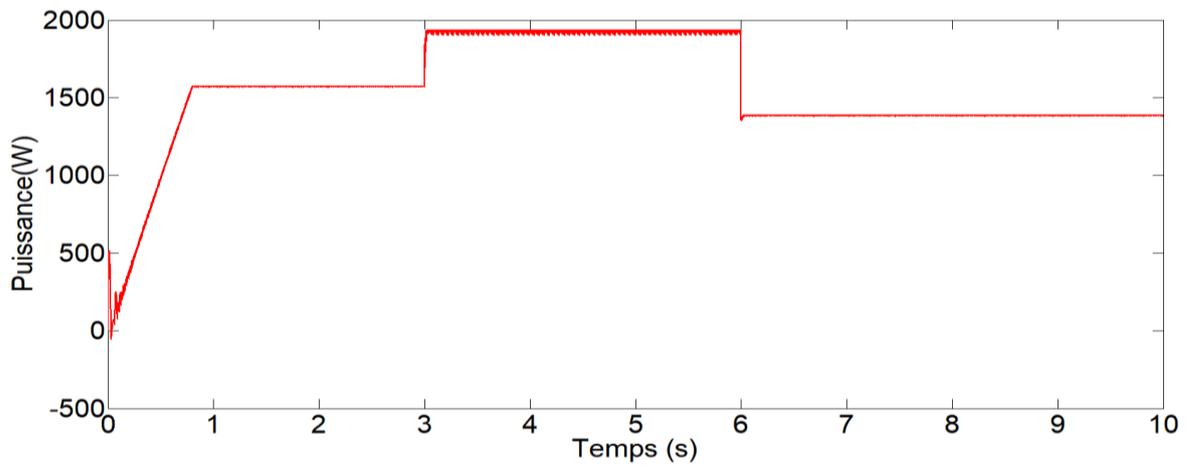


Figure 3.27 : Allure de la puissance de GPV ( $G1=800$  ;  $G2 =1000$  ;  $G3=700$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

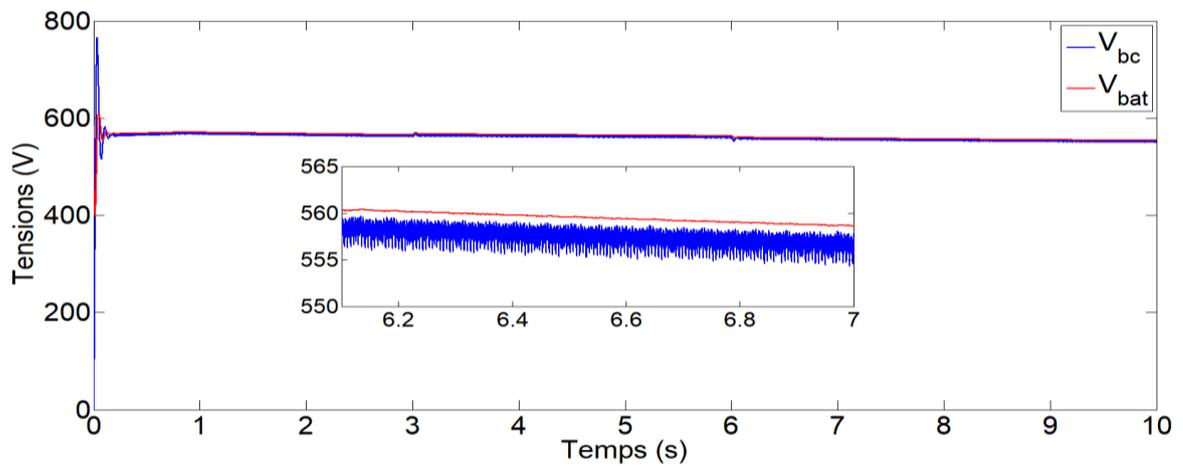


Figure 3.28 : Allure des tensions de la batterie et du bus contenu ( $G1=800$  ;  $G2 =1000$  ;  $G3=700$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

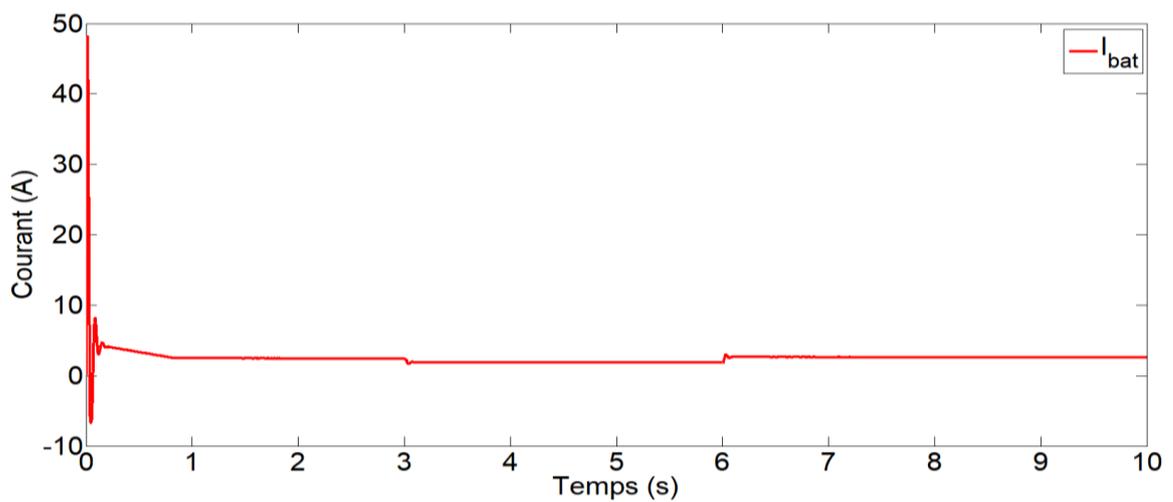


Figure 3.29 : Allure du courant de la batterie ( $G1=800$  ;  $G2 =1000$  ;  $G3=700$  et  $T=25^{\circ}\text{C}$ ).

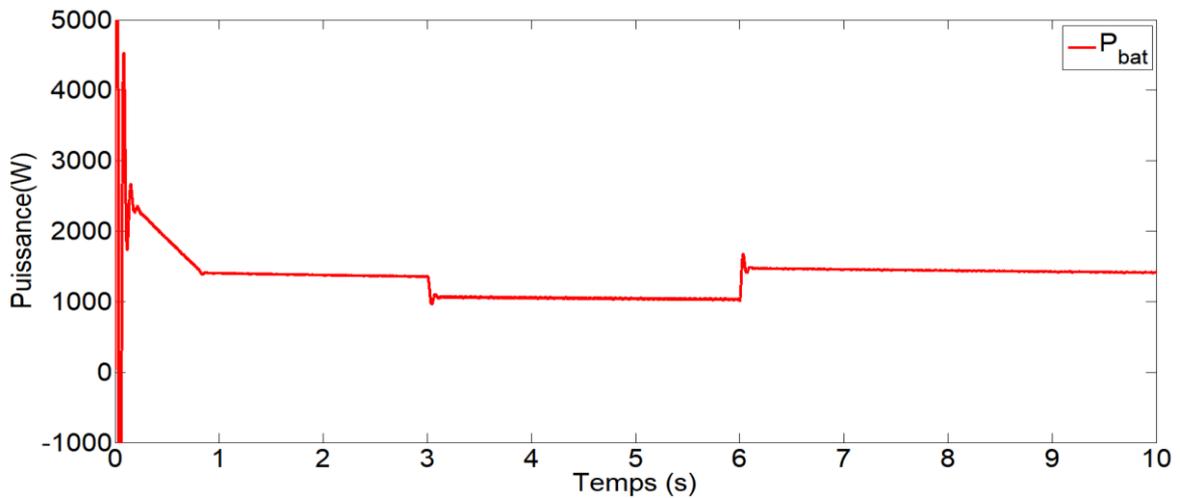


Figure 3.30 : Allure de la puissance de batterie ( $G1=800$  ;  $G2 =1000$  ;  $G3=700$  et  $T=25^{\circ}C$ ).

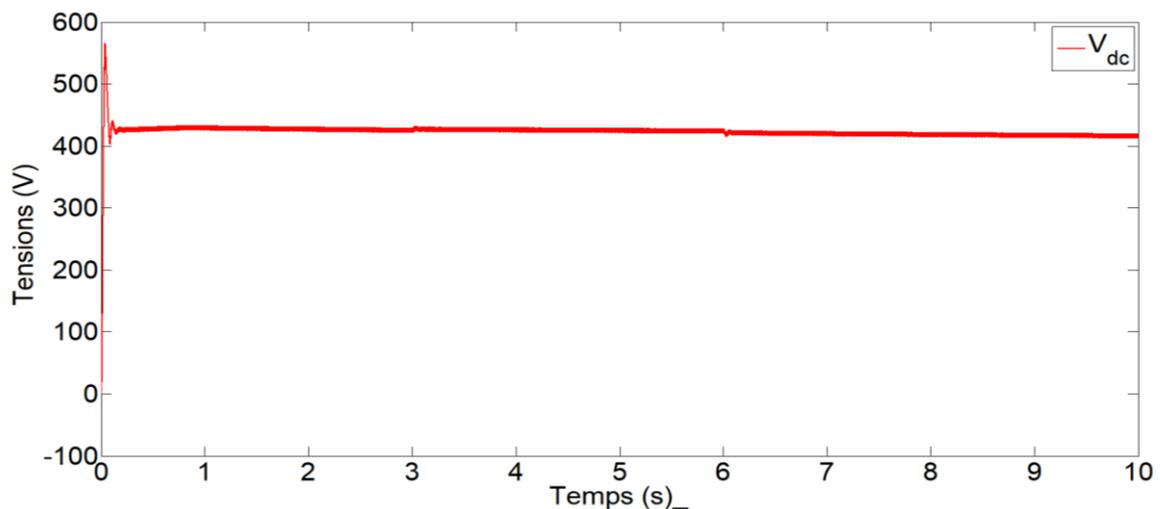


Figure 3.31 : Allure de la tension de source ( $G1=800$  ;  $G2 =1000$  ;  $G3=700$  et  $T=25^{\circ}C$ ).

Au premier profil d'éclairement ( $G=800W/m^2$ ), la valeur maximale de la puissance du GPV ( $P_{GPV}=1576W$ ) correspondant à une tension parfaite  $V_{GPV}=242V$  et un courant parfait de  $I_{GPV}=6.45A$ . Ainsi pour la vitesse de la MCC  $Nm=512tr/min$  comme le montrent les Figures 3.25 à 3.32. Pour une faible valeur d'éclairement de  $G=700W/m^2$ , la valeur maximale de la puissance du GPV  $P_{GPV}=1385W$ , correspondrait à une tension parfaite  $V_{GPV}=243V$  et un courant parfait  $I_{GPV}=5.65A$ , la vitesse prend la même valeur, et le couple de charge  $C_r= 22.5N.m$ .

### 3.9 Conclusion

Les systèmes solaires permettent un approvisionnement en eau à partir d'une source à n'importe quel endroit même si aucune source d'énergie n'est présente sur le site isolé. Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement et les composants essentiels d'une chaîne de pompage basée sur un GPV qui alimente la MCC, cette étude nous a permis d'avoir une bonne connaissance sur le sujet.

### Référence bibliographique

- [1] A. Bouden et M. Marir Benabbas, « Modélisation de système de pompage photovoltaïque optimisé » *Conférence Internationale des Energies Renouvelables, Sousse-Tunisie, 2013.*
- [2] M. Capderou, « Atlas Solaire de l'Algérie Modèles Théoriques et Expérimentaux », *Synthèse bibliographique par Pr. A.Malek ROULA, Algérie, 2011.*
- [3] Akassewa Tchapo SINGO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », *Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.*
- [4] M. Djeroui Salim « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », *Mémoire de Master, Chapitre 1. Page (5,6), Université Abbes Farhat de Sétif, 2011.*
- [5] B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », *Article, STI ELT Approche générale, juin 2007.*
- [6] Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », *Thèse de doctorat de l'Université de Constantine, 2010.*

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Les systèmes photovoltaïques sont de plus en plus populaires en raison de leur capacité à produire une énergie propre et renouvelable. Ils peuvent être utilisés pour alimenter les maisons, les entreprises et même les grands réseaux électriques. L'installation de tels systèmes peut contribuer à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à atténuer les effets du changement climatique.

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque dans le secteur agricole et sur des sites isolés présente de nombreux avantages. Les systèmes photovoltaïques permettent d'alimenter en électricité les installations agricoles situées dans des zones éloignées, où l'accès au réseau électrique conventionnel peut être limité ou coûteux. Cela inclut l'éclairage des bâtiments, les systèmes d'irrigation, les pompes à eau, les clôtures électriques, les équipements de réfrigération, etc. En utilisant l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques de l'agriculture, il est possible de réduire considérablement les coûts liés à l'électricité. Les coûts d'exploitation à long terme peuvent être réduits car l'énergie solaire est une ressource gratuite et abondante une fois le système installé. L'énergie solaire peut être utilisée pour alimenter les systèmes d'irrigation, ce qui est particulièrement avantageux dans les régions où l'eau est rare ou coûteuse. Les pompes solaires peuvent puiser l'eau des puits ou des réservoirs et la distribuer de manière efficace et économique aux cultures. Les systèmes photovoltaïques sont souvent modulaires et peuvent être adaptés en fonction des besoins spécifiques d'un site agricole. Ils peuvent être installés sur des structures existantes (toits de bâtiments, hangars agricoles) ou sous forme de panneaux solaires montés sur des structures mobiles, offrant ainsi une certaine flexibilité.

Il convient de noter que l'installation d'un système photovoltaïque agricole sur un site isolé nécessite une évaluation approfondie des besoins énergétiques spécifiques, de l'ensoleillement disponible, de la capacité de stockage de l'énergie et des coûts associés

Annexe A : Cellule photovoltaïque

**A. Cellule photovoltaïque**

**A.1 Structure physique**

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux.

Pour qu'un électron lié à son atome (**bande de valence**) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (**bande de conduction**).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17% [1].

Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p (Figure A.1).

Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%).

La face arrière peut-être entièrement métallisée.

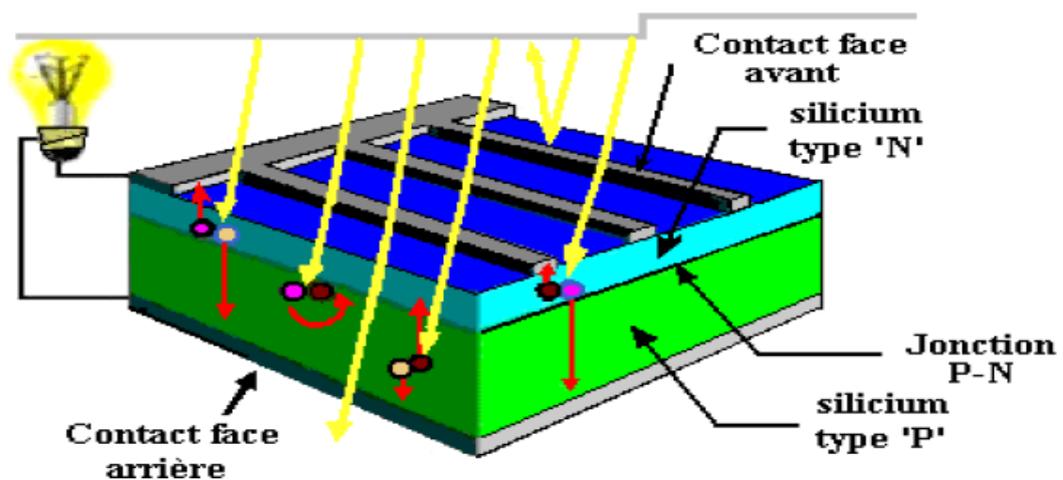


Figure A.1 : Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.

## A.2 Rendement

Le rendement de la cellule PV est un des critères de qualité de ce type de capteur. Ainsi, cette mesure est effectuée selon des normes précises en fixant un type de spectre lumineux, une pression et une température de fonctionnement.

Nous parlons ici uniquement du rendement global de conversion d'énergie des photons en électrons traduit par la puissance électrique délivrée par les cellules PV, par rapport à un éclairage de 1000 W/m<sup>2</sup> de type AM1.5 pour pouvoir ainsi effectuer des comparaisons objectives des diverses performances de cellules.

Le rendement dépend du matériau utilisé et des pertes liées à la technologie mise en œuvre pour réaliser une cellule.

Parmi les matériaux les plus utilisés et en raison de son faible coût, on trouve le silicium (Si) sous ses différentes formes cristallines (monocristallin, poly cristallin ou bien amorphe), Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, Ils sont composés de cristaux de silicium de grande pureté.

## A.3. Fonctionnement :

Lorsque cette cellule sera exposée au rayonnement, les photons créent des paires d'électron trou avec une énergie plus grande que la bande d'énergie du semi-conducteur.

Ceci s'appelle l'effet photovoltaïque, a été découvert par Edmond Becquerel en 1889.

Les porteurs de charge nouvellement créés dans la région d'épuisement sont séparés par le champ électrique existant. Ceci mène à une accumulation d'un potentiel de tension appelé photo-voltage.

Dès qu'une charge sera reliée à la cellule, cette tension causera un courant (appelé le photo-courant) qui circulera dans le circuit.

Annexe B: Association de cellule photovoltaïque

**B. Association de cellule photovoltaïque**

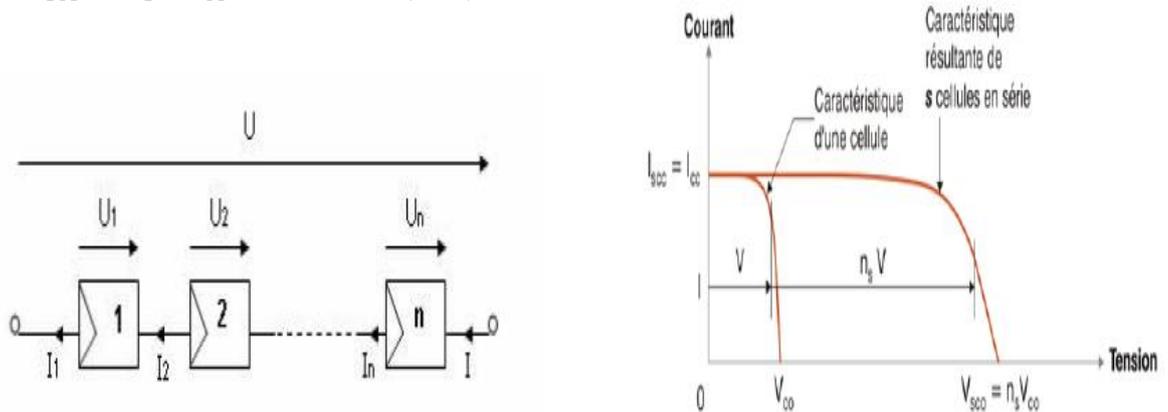
**B.1 Association série**

Dans un groupement de  $N_s$  cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même.

La (figure B.1) montre la caractéristique résultante ( $I_{scc}$ ,  $V_{sco}$ ) avec [1] :

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (B.1)$$

$$V_{sco} = n_s * V_{co} \quad (B.2)$$



**Figure B.1 :** Caractéristique résultante obtenue en association en série

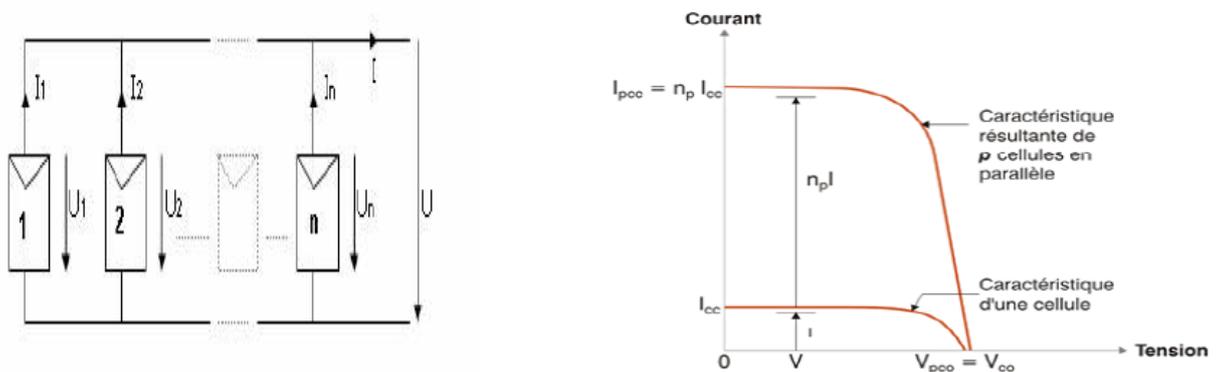
**B.2 Association en parallèle**

Dans un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition du courant.

(La figure B.2) montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ,  $V_{pco}$ ) Avec[1] :

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \quad (B.3)$$

$$I_{pco} = V_{co} \quad (B.4)$$



**Figure B.2 :** Caractéristique résultante obtenue en association en parallèles.

**B.3 Association en série/parallèle**

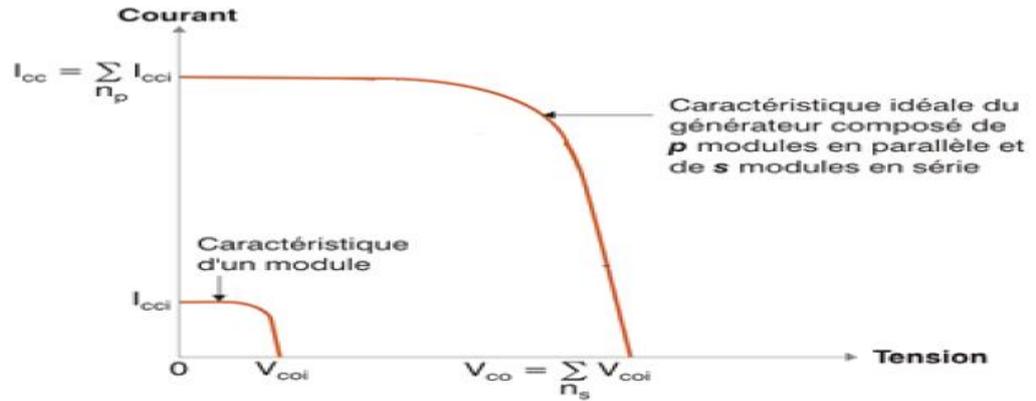
Selon l'association en série et en parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale son données par les relations suivant [1] :

$$I_{spcc} = n_p * I_{cc} \quad (B.5)$$

$$V_{spco} = n_s * V_{co} \quad (B.6)$$

$n_p$  : Nombre de cellule en parallèle.

$n_s$  : Nombre de cellule en série.



**Figure B.3 :** Caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.

### Biographique Annexe B

- [1] S. ABOUDA. « Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïque » Thèse. Université de Reims Champagne-Ardenne.2015

Annexe C: PPM

C.1 Principe de la Recherche du PPM

Ce principe assure que le système sera toujours amené à son optimum de puissance est décrit schématiquement par (la figure C.1 et figure C.2) [1].

(Les figure C.1 et C.2) illustre trois cas de perturbations.

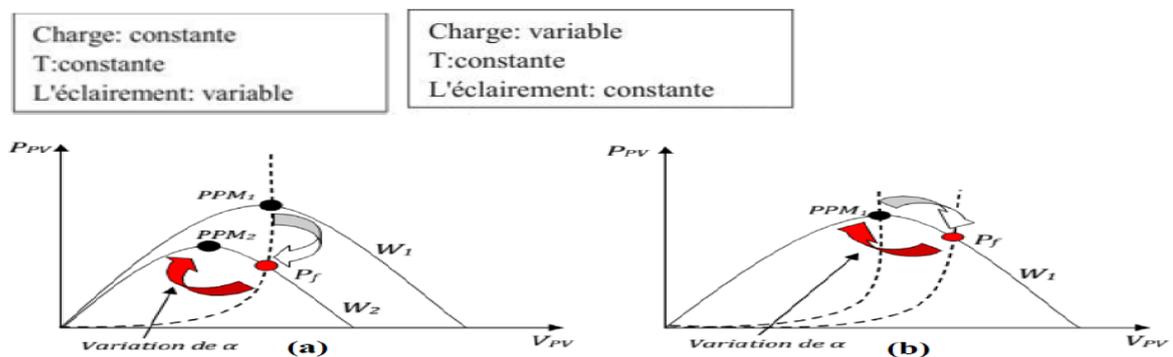
Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum [1].

Dans ces cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

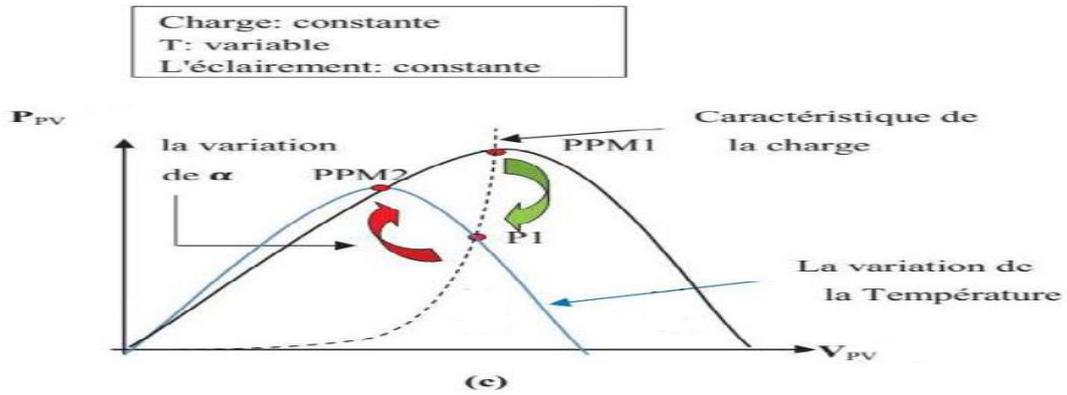
Dans le cas 2.2(b) pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimal grâce à l'action d'une commande.

Enfin dans le dernier cas II.3 la variation du point de fonctionnement peut se produire lié à la variation de température de fonctionnement du GPV, bien qu'il faille également agir au niveau de la commande [2].

Dans le cas réel, cette variation est due aux trois cas précédents en même temps.



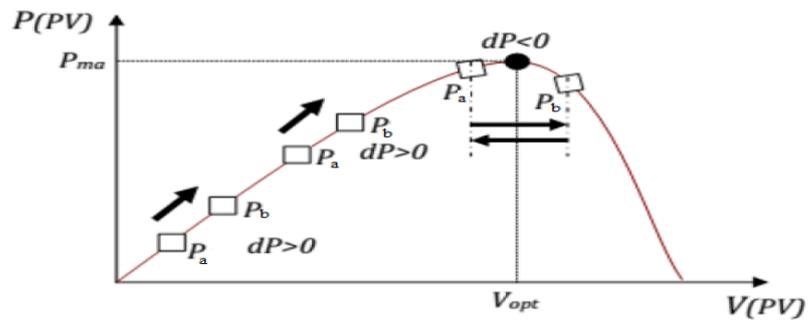
**Figure C.1 :** Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclaircement (a) et la charge R (b).



**Figure C.2 :** Fluctuation du PPM avec l'intensité de la température (c).

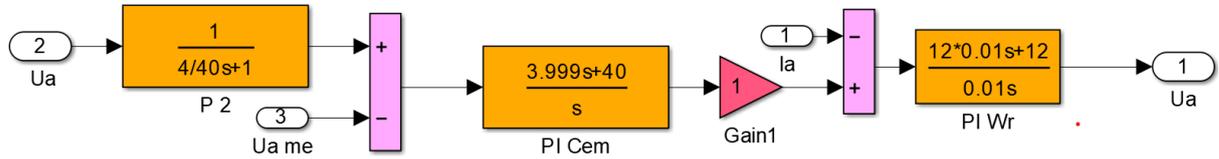
La comparaison des  $P_a$  et  $P_b$  mesurées respectivement aux instants (t-1) et (t) permet de chercher le point de la puissance maximale, (figure C.3) en incrémentant ou décrémentant le rapport cyclique  $\alpha$ . Si la dérivée est positive ( $P_a < P_b$ ), cela signifie que nous nous rapprochons du PPM en incrémentant  $\alpha$ , et si la dérivée de la puissance est négative ( $P_a > P_b$ ), cela veut dire que nous l'avons dépassé PPM nous devons décrémenté  $\alpha$ .

Une fois  $\alpha$  modifié, on prend sa valeur et on effectue une nouvelle mesure de  $I_{pv}$ ,  $V_{pv}$  pour calculer la nouvelle puissance.



**Figure C.3 :** Présentation de l'organigramme amenant le système à un fonctionnement à son PPM.

## C.2 Schéma bloc de régulateur PI au niveau de Matlab/Simulink



**Figure c.4 :** Schéma de la régulateur PI au niveau de *MATLAB/SIMULINK*.

### Biographique Annexe C

[1] H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », *Revue des Energies renouvelables* vol.17 N: 3(2014) 435-445, Tunisia.

[2] D. Boukhers, « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », *Magister en électronique, Université de Constantine*, 200

Annexe D: Les paramètres du système

Désignation	Valeur
<b>K</b>	$1.38065e^{-23}$
<b>Q</b>	$1.6022e^{-19}$
<b>Ncell</b>	36
<b>Tcell</b>	25+273
<b>N</b>	2
<b>Rp</b>	$415.9*Ncell$
<b>Voc</b>	21.9V
<b>Vmp</b>	17.7V
<b>Isc</b>	8.16A
<b>Imp</b>	7.69A
<b>Vth</b>	$(K*Tcell)/q$
<b>Iso</b>	$Isc / ((exp(Voc / (Vth*Ncell)) - 1))$
<b>A</b>	$(1 / Tcell) - (1 / T)$
<b>B</b>	$-(q*1.12) / (K*N)$
<b>Is</b>	$Iso * (((Tcell) / (273+25))^{(3 / N)}) * (exp(a*b))$
<b>Rs</b>	$Ncell * Vth * \log((Isc - Imp) / Is) / Imp - Vmp / Imp$
<b>L</b>	$88e^{-3} H$
<b>C</b>	$1.2e^{-3}$
<b>R</b>	0.8 $\Omega$
<b>T</b>	$1e^{-3} s$
<b>Vbat</b>	576 V
<b>Vpv</b>	576V
<b>Vréf_bat</b>	600V
<b>Ra</b>	0.6 $\Omega$
<b>La</b>	0.006 H
<b>J</b>	0.1 kg.m <sup>2</sup>
<b>f</b>	0.001 hz
<b>K</b>	I

### ملخص:

مصدر الطاقة الصحيح للمحركات، خاصة في المناطق التي لا توجد بها التيار الكهربائي هو عائق أمام محطات الضخ. لهذا ركزت أطروحة هذا الماستر على هذه القضية الحساسة. لذلك يبدو أن الطاقة الكهروضوئية ذات الأصل الشمسي هي الحل الأكثر كفاءة. لتلبية احتياجات الطاقة لتشغيل المحركات ولتلبية احتياجات الاستخدامات المعزولة، كما هو الحال في العديد من مناطق بلدنا يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بنمذجة لوحة كهروضوئية مرتبطة بمحول DC-DC يتحكم فيه MPPT ، ويقصد به التسبب في آلة التيار المباشر. يمكن للمولد الكهروضوئي أن يعمل على نطاق واسع جهد الخرج والنطاق الحالي ولكن يمكن أن يوفر فقط الحد الأقصى من الطاقة لقيم معينة للتيار والجهد. يمكن تخزين الطاقة الكهربائية التي ينتجها المولد الكهروضوئي في بطاريات حسب الحاجة. من بين مكونات محطة الطاقة الشمسية جهاز تعقب الطاقة الشمسية. في الواقع ، تعتمد الخاصية (V) I للمولد على الإضاءة الشمسية ودرجة الحرارة. تتسبب هذه التغيرات المناخية في تذبذب أقصى نقطة للطاقة. بسبب هذا التقلب، غالبًا ما يتم تداخل واحد أو أكثر من المحولات الثابتة المتحكم بها بين المولد والمستقبل مما يسمح بمتابعة أقصى نقطة للطاقة وذلك باستخدام طريقة الإزجاج والمراقبة (P&O). ترتبط هذه الأوامر ، المعروفة باسم MPPT (الحد الأقصى لمتابعة نقطة الطاقة) ، بمحول DC-DC ، والذي يضمن الاقتران بين المولد الكهروضوئي وجهاز التيار المستمر عن طريق إجبار الأول على توفير أقصى طاقته.

الكلمات الرئيسية: مولد الطاقة الكهروضوئية ، المروحية DC-DC ، MPPT ، O&P ، محرك DC

### Résumé :

L'alimentation correcte en énergie pour les moteurs, surtout dans les zones dépourvues de courant électrique, est un handicap pour les stations de pompage. C'est sur cette délicate problématique qu'a porté ce mémoire de master. L'énergie photovoltaïque d'origine solaire apparaît donc comme la solution la plus attractive pour répondre aux besoins en énergie et pour alimenter les moteurs et pour satisfaire les besoins d'utilisations isolées, comme c'est le cas de beaucoup de régions de notre pays. Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, d'un panneau photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT, destiné à entraîner une machine à courant continu. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. L'énergie électrique produite via le générateur PV peut être stockée dans des batteries selon les besoins. Parmi les composants d'une centrale solaire, on trouve le tracker solaire. En effet la caractéristique I(V) du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale et cela en utilisant la méthode perturbation et observation (P&O). Ces commandes connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking), sont associées au convertisseur DC-DC, lequel assure le couplage entre le générateur PV et la machine à courant continu en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Hacheur DC-DC, MPPT, P&O, Moteur à courant continu.

### Abstract:

The correct power supply for motors, especially in areas without electric current, is a handicap for pumping stations. It is on this delicate problem raised by this master's thesis. Photovoltaic energy of solar origin therefore appears to be the most efficient solution. Attractive to meet the energy needs to power the motors and to meet the needs of isolated uses, as is the case in many regions of our country. The work presented in this thesis concerns the modeling of a photovoltaic panel associated with a DC-DC converter controlled by MPPT, intended to cause a direct current machine. A photovoltaic generator can operate in a wide output voltage and current range but it can only deliver maximum power for particular values of current and voltage. The electrical energy produced by the PV generator can be stored in batteries as needed. Among the components of a solar power plant is the solar tracker. Indeed, the characteristic I (V) of the generator depends on the solar illumination and the temperature. These climatic variations cause the maximum power point to fluctuate. Because of this fluctuation, one or more controlled static converters are often interposed between the generator and the receiver allowing the maximum power point to be tracked and this by using the disturbance and observation (P&O) method. These commands, known as MPPT (Maximum Power Point Tracking), are associated with the DC-DC converter, which ensures the coupling between the PV generator and the DC machine by forcing the former to deliver its maximum power.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Hacheur DC-DC, MPPT, P&O, Moteur à courant continu.